

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

SISTEMAS LTE PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD

**Patricia Taboada Pérez
Tutor: Bazil Taha Ahmed**

ENERO 2016

SISTEMAS LTE PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD

AUTOR: Patricia Taboada Pérez

TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Enero de 2016



Resumen

LTE es una tecnología móvil de banda ancha estandarizado por el 3GPP. Es una evolución mejorada de GSM y WCDMA/HSPA que introduce variantes de las cuales se tratarán a continuación. Sin embargo son dos aspectos importantes los que se destacan, todos los servicios se soportan sobre el protocolo IP y las velocidades de pico de la interfaz de radio se sitúan entre 100 Mb/s y 1 G/s.

Aunque LTE se conoce como un sistema perteneciente al 4G, en realidad no cumple todos los requisitos que fija la ITU respecto a velocidades de pico de transmisión y eficiencia espectral, por lo que es un sistema 3.9G.

Este Trabajo Fin de Grado evalúa el despliegue de una red LTE en líneas de alta velocidad basado en la interfaz de radio OFDMA para los canales de *downlink*. Se llevará a cabo un análisis tanto de la SINR como de la tasa binaria media para saber cuánta cobertura y capacidad de servicio se dispone dependiendo del tipo de antena.

Para ello, se parte de un modelo de propagación *Dual-Slope* en el cual se define un punto de ruptura conocido como *breakpoint*, definiendo así dos zonas de transmisión de datos. Además, tendrá en cuenta factores atenuantes que afecten a la señal y las antenas que se utilicen.

Finaliza con un pequeño análisis en un escenario real entre Madrid y Ciudad Real, incluido en el Anexo C.

Palabras clave

LTE, antena, ancho de banda, modulación, codificación, downlink, tasa binaria, SINR.

Abstract

LTE is a mobile technology of broad band standardized for 3GPP. It is an evolution improved of GSM and WCDMA/HSPA that introduces variants which it will explain later. However, there are two important aspects that include all services supported on the IP protocol and peak speeds of the radio interface are between 100 Mb/s and 1 G/s.

Although LTE is known as a system belonging to 4G, it really does not meet all the requirements set by the ITU regarding peak transmission speed and spectral efficiency, so it is a 3.9G system.

This Bachelor Thesis evaluates the deployment of a network LTE in lines of high speed based on the interface of radio OFDMA for the channels of *downlink*. An analysis will be carried out both of the SINR and of the binary average rate to know all coverage and capacity of service we have according to the antennas which we have.

To do this, we start from a propagation model *Dual-Slope* in which it define a point of break known as *breakpoint*, defining this way two zones of transmission of information. In addition, it will bear in mind attenuating factors that concern our sign and the antennas that it use.

It concludes with a short analysis in a real setting between Madrid and Ciudad Real, this one included in Appendix C.

Keywords

LTE, antenna, bandwidth, modulation, coding, downlink, bit rate, SINR.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo la dedicación y confianza de mi tutor, Bazil. Gracias por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto y por estar siempre disponible cuando lo he necesitado, sin ti habría sido muy difícil conseguirlo.

A todos mis compañeros que han estado conmigo durante estos últimos cuatro años, tanto a los que comenzaron conmigo como a los que he ido conociendo, han hecho que esta etapa sea inolvidable. Son muchos momentos los que se me vienen a la cabeza, algunos malos, pero como dicen, siempre hay que quedarse con los buenos, las comidas, los paseos en los descansos, los momentos en clase e incluso, nunca pensé que diría esto, las prácticas en los laboratorios. Gracias amigos por estar ahí día a día y darme vuestro apoyo cuando lo he necesitado. Sois geniales.

No me quiero olvidar de otra parte importante de mi vida, mis Tussas, soportándome muchos años, a mí y a mi estrés sobre todo estos últimos años. Aunque no entendieran mis preocupaciones siempre he contado con su apoyo y con sus ánimos, sacándome una sonrisa. Gracias chicas.

Por último y especialmente, a mis padres y hermana, a mi familia. Gracias por haber hecho de mí la que persona que soy. Por haberme enseñado el valor de las cosas, que con esfuerzo nada es imposible y que siempre se puede sacar el lado positivo. Gracias por brindarme vuestro apoyo incondicional sobre todo en los momentos más difíciles. A mi abuela por su apoyo y cariño. Os quiero.

Para todos vosotros

*Patricia Taboada Pérez
Enero 2016*

INDICE DE CONTENIDOS

1 Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organización de la memoria	2
2. Tecnologías de radiocomunicaciones y AVE	3
2.1 Introducción	3
2.2 Sistemas 3.9G LTE	3
2.2.1 Características técnicas de LTE	4
2.2.2 Modulaciones que soporta.....	5
2.2.2.1 Modulación por desplazamiento de fase (PSK)	5
2.2.2.2 Modulación por amplitud en cuadratura (QAM)	5
2.2.3 Interfaz de radio	6
2.2.3.1 Concepto de bloque de recursos.....	8
2.2.3.2 Concepto de prefijo cíclico	8
2.2.4 Modo de funcionamiento: TDD.....	9
2.2.5 Arquitectura de una red LTE.....	10
2.3 Trenes de Alta Velocidad (TAV).....	11
2.4 Estado del arte.....	12
3 Sistemas LTE en AVE.....	13
3.1 Introducción	13
3.2 Modelos de propagación	13
3.3 Cálculo de la tasa binaria del downlink	15
4 Resultados	21
4.1 SINR	21
4.1.1 Banda de 800 MHz.....	21
4.1.2 Banda de 2.6 GHz	23
4.2 Tasa binaria	24
4.2.1 Banda de 800 MHz.....	24
4.2.2 Banda de 2.6 GHz	28
5 Conclusiones y trabajo futuro	32
5.1 Conclusiones	32
5.2 Trabajo futuro	33
Referencias	35
Glosario	37
Anexos.....	39
A Antenas de estación base.....	39
B Antenas del AVE.....	41
C Análisis de un caso real	42

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Evolución de la velocidad en las redes existentes.....	4
Figura 2.2: Ejemplos de constelaciones 16-QAM (izquierda) y QPSK (derecha) de una modulación digital	6
Figura 2.3: Representación de una señal OFDM en frecuencia y en tiempo	7
Figura 2.4: Concepto de Radio Bloque (RB)	8
Figura 2.5: Inserción del prefijo cíclico.....	8
Figura 2.6: Principales modelos de funcionamiento FDD y TDD	9
Figura 2.7: Arquitectura de una red LTE	10
Figura 2.8: Tren de alta velocidad (TAV)	11
Figura 4.1: Cálculo SINR para $R = 1000$ m a 800 MHz con respecto a la BS	22
Figura 4.2: Cálculo SINR con R máxima con respecto a la BS	22
Figura 4.3: Cálculo SINR para $R = 1000$ m a 2.6 GHz con respecto a la BS	23
Figura 4.4: Evolución de la tasa binaria media a 800 MHz y SLL 15 dB.....	25
Figura 4.5: Representación de la tasa binaria en 800 MHz, $R = 1000$ m respecto a la BS con SLL 15 dB.....	25
Figura 4.6: Evolución de la tasa binaria media a 800 MHz y SLL 20 dB.....	26
Figura 4.7: Representación de la tasa binaria en 800 MHz, $R = 1000$ m respecto a al BS con SLL 20 dB.....	27
Figura 4.8: Representación de la tasa binaria con R máxima de la BS a 800 MHz	27
Figura 4.9: Evolución de la tasa binaria media a 2.6 GHz y SLL 15 dB	28
Figura 4.10: Representación de la tasa binaria en 2.6 GHz, $R = 1000$ m respecto a la BS con SLL 15 dB.....	29
Figura 4.11: Evolución de la tasa binaria media a 2.6 GHz y SLL 20 dB	30
Figura 4.12: Representación de la tasa binaria en 2.6 GHz, $R = 1000$ m respecto a la BS con SLL 20 dB.....	30
Figura 4.13: Representación de la tasa binaria con R máxima de la BS a 2.6 GHz.....	31
Figura A.1: Antena de parche direccional plana.	39
Figura A.2: Diagrama de radiación de una antena de parche direccional plana	40
Figura A.3: Técnica de las antenas SIMO	40

Figura B.1: Antena omnidireccional de doble banda	41
Figura B.2: Diagrama de radiación de antena omnidireccional de doble banda	41
Figura C.1: Recorrido Madrid-Ciudad Real	42
Figura C.2: Antenas de base extra para curvas pronunciadas	44

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Valores para el cálculo de las pérdidas de propagación	14
Tabla 3.2: Número de RBs y subportadoras disponibles según el ancho de banda	15
Tabla 3.3: Distribución normal $N(0,1)$	17
Tabla 3.4: Tasa binaria y SINR según la tasa de codificación	20
Tabla 4.1: Valores específicos para el cálculo del SINR y la tasa binaria media	21
Tabla 4.2: Tasa binaria media a 800 MHz y SLL 15 dB	24
Tabla 4.3: Tasa binaria media a 800 MHz y SLL 20 dB	26
Tabla 4.4: Tasa binaria media a 2.6 GHz y SLL 15 dB	28
Tabla 4.5: Tasa binaria media a 2.6 GHz y SLL 20 dB	29
Tabla A.1: Especificaciones de antena de parche plana	39
Tabla B.1: Especificaciones de antena omnidireccional de doble banda	41
Tabla C.1: Número total de antenas teóricas para cubrir el trayecto	43
Tabla C.2: Número total de antenas prácticas para cubrir el trayecto	45

1 Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad, Internet es el medio de comunicación más utilizado. La sociedad está acostumbrada a que forme parte de su día a día hasta convertirse en una necesidad el poder tener acceso a Internet desde cualquier lugar. Por este motivo, desarrollar un sistema que proporcione Internet en los trenes de alta velocidad, y así aumentar las prestaciones y comodidades para sus usuarios es una necesidad importante.

Una de las soluciones que se propone es aplicar la nueva tecnología LTE que forma parte del 4G. Su objetivo principal es conseguir una mayor calidad de la conexión móvil y aumentar la eficiencia espectral disponible, evitando la saturación de redes móviles. Se ha abierto la puerta a innovadores servicios y aplicaciones en el área empresarial y de las administraciones públicas como el uso de la video llamada.

En Trabajos de Fin de Grado anteriores [8] se ha realizado el despliegue de estas redes en otros entornos como es el caso de las autopistas. La diferencia en este proyecto es principalmente la existencia de mayores pérdidas debido a las altas velocidades y a los elevados cambios de las células de cobertura, situación que no ocurre en otros entornos y que supone un reto llevarlo a cabo.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio de un sistema LTE en líneas de alta velocidad, evaluando tanto la cobertura como la capacidad del *downlink* en distintas condiciones y teniendo en cuenta los posibles factores que puedan afectar a la señal.

Se pretende sentar las bases de esta tecnología para entender el funcionamiento de las redes LTE, así como sus principales características. Una vez solucionado lo anterior, se indicará la programación realizada para poder llegar a los resultados, realizando así el despliegue de la red LTE en el AVE, evaluando los servicios, los fenómenos atenuantes de este entorno y otros parámetros como el tipo de antenas, las dimensiones y prestaciones del vehículo o la distancia entre las BS entre otros. Así se evalúan las mejoras que se pueden llevar a cabo en la tasa binaria o en el SINR.

En las conclusiones se podrá encontrar la evaluación final y lo aprendido tras la elaboración del trabajo, así como las posibles líneas de investigación que se pueden dar.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Introducción
- Capítulo 2: Tecnologías de radiocomunicaciones y AVE
- Capítulo 3: Sistemas LTE en AVE
- Capítulo 4: Resultados
- Capítulo 5: Conclusiones y trabajo futuro

2 Tecnologías de radiocomunicaciones y AVE

2.1 Introducción

El continuo crecimiento de las telecomunicaciones móviles, desde la introducción de GSM (inicialmente referido como GSP) hasta la innovadora tecnología UMTS (también conocida como 3G), ha impulsado el desarrollo de una nueva generación en las telecomunicaciones móviles llamada 4G. El grupo encargado de la estandarización de 4G en GSM es 3GPP, el cual eligió la tecnología LTE para garantizar las altas velocidades planteadas, siendo mejorada seguidamente con la LTE-Advanced. La actual ruta tecnológica contempla a HSPA+, HSUPA y dos técnicas de radio como OFDMA y MIMO, las cuales están incluidas en LTE. Es de esperar que todo lleve a una disminución de los costes en cuanto a la red y servicios, como veremos a continuación.

Este capítulo engloba toda la información técnica acerca de LTE, tanto los tipos de modulación que puede soportar, los modos de funcionamiento como su interfaz de radio. Además de conocer las medidas técnicas del vehículo sobre el cual se va a desarrollar este análisis.

2.2 Sistemas 3.9G LTE

La tecnología LTE introduce una gran variedad de novedades con los estándares anteriores, pero la novedad más significativa es que está orientada a datos y basada en una arquitectura de conmutación de paquetes IP. Las velocidades que se consiguen en la interfaz de radio con LTE también aumentan respecto a la última generación, llegando a un rango de 100 Mbit/s y 1 Gbit/s. Los objetivos establecidos fueron conseguir eficiencias espectrales y flexibilidad en la asignación de frecuencias.

En este capítulo se incluyen en los sucesivos apartados las características técnicas de LTE, las modulaciones que soporta, las tecnologías de transmisión del nivel físico que se usan en el enlace descendente, OFDMA, los modos de funcionamiento y describiendo también la arquitectura de una red.

2.2.1 Características técnicas de LTE

Desde sus comienzos en 2004, el trabajo sobre LTE se centró en mejorar el acceso radio terrestre de UMTS (UTRA) y la optimización de la arquitectura 3GPP de acceso radio. En el enlace descendente, *downlink*, se obtendrían velocidades de datos de usuario de 100 Mbit/s y de 50 Mbit/s en el ascendente, *uplink*. Los principales atributos que diferencian a LTE de las generaciones anteriores son [1]:

- Velocidades de datos de pico de un solo canal de hasta 300 Mbps en *downlink* y 75 Mbps en *uplink*.
- Mejora de la eficiencia espectral, en particular para *uplink*.
- Plena integración de los modos de acceso tanto para FDD como TDD.
- Utilización de una red basada en paquetes, EPC, para eliminar el coste y la complejidad asociada con las redes de conmutación.

La primera especificación de LTE se recoge en *Release 8* (Rel-8) del 3GPP en diciembre de 2008, donde se describen algunas de las claves introducidas, las cuales permitieron nuevas capacidades como:

- OFDMA y SC-FDMA como nuevas interfaces de radio.
- Apoyo a seis anchos de banda de canal de 1.4 MHz a 20 MHz para permitir altas velocidades de datos y eficiente espectro.
- MIMO sobre *downlink*.
- Mecanismos de control de la capa física más rápidos que conducen a una menor latencia.

La característica más asociada con LTE es probablemente la velocidad. Aunque fueran dirigidos a la aplicación de baja movilidad en el rango de 0-15 km/h, el sistema es capaz de trabajar a mayor velocidad y es compatible con un alto rendimiento de 15- 120 km/h, y funcional entre 120-350 km/h. Desde sus comienzos fue diseñado para utilizar una tecnología MIMO, dando lugar a un enfoque más integrado a esta avanzada tecnología. A pesar de las capacidades de LTE en *Release 8*, el estándar 3GPP ha seguido evolucionando hasta llegar al *Release 12* con LTE-Advanced. En la Figura 2.1 se muestra la evolución desde la creación del *Release 99* hasta *Release 8*, la cual engloba la tecnología bajo estudio, tanto en *downlink* como en *uplink*.

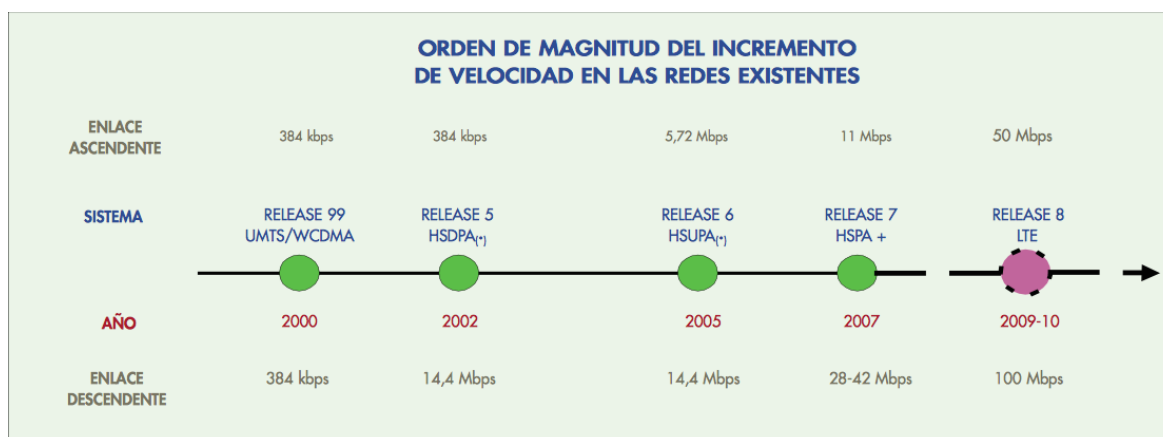


Figura 2.1: Evolución de la velocidad en las redes existentes

2.2.2 Modulaciones que soporta

El uso de sistemas de modulación de orden superior [2] como PSK, 16-QAM y 64-QAM son necesarios en esta interfaz radioeléctrica para conseguir aumentar la velocidad de transmisión de los datos. Modulaciones de más alto nivel proporcionan mayor número de bit eficaces por símbolo y por lo tanto mayor tasa binaria. Por el contrario, estas modulaciones presentan constelaciones más complejas y son más sensibles a interferencias, por lo que necesitarán mayores requisitos de potencia para mantener el mismo EVM, que es la diferencia entre el vector ideal (transmisor) y el vector medido en el receptor. Se mide en tanto por ciento.

2.2.2.1 Modulación por desplazamiento de fase (PSK)

PSK es una forma de modulación digital angular de amplitud constante en la cual la señal de entrada es una señal digital binaria. Es posible tener una cantidad limitada de fases de salida.

En la modulación por desplazamiento binario de fase, BPSK, son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia portadora. Una fase de salida representa un 1 lógico, y la otra un 0 lógico. Cuando la señal de entrada digital cambia de estado, la fase de la portadora de salida varía entre dos ángulos que están desfasados 180° .

La transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria, QPSK, es una técnica de codificación M-ario, donde $M = 4$. Son posibles cuatro fases de salida para una sola frecuencia de la portadora. Para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita más de un solo bit de entrada ya que la entrada digital a un modulador de QPSK es una señal binaria. Con 2 bits, hay cuatro posibles condiciones: 00, 01, 10 y 11 como se aprecia en la Figura 2.2. Debido a esto, con QPSK, los datos de entrada binarios se combinan en grupos de 2 bits llamados dibits. Cada uno de ellos genera una de las cuatro fases de entrada posibles. Por tanto, para cada dibit de 2 bits introducidos al modulador ocurre un solo cambio de salida. Así que, la razón de cambio en la salida es la mitad de la razón de bit de entrada.

2.2.2.2 Modulación por amplitud en cuadratura (QAM)

QAM es una modulación digital en la que el mensaje está contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida. Se basa en la transmisión de dos mensajes independientes por un único camino. Esto se consigue modulando una misma portadora, desfasada 90° entre un mensaje y otro. Como las portadoras ortogonales ocupan la misma banda de frecuencia y difieren 90° por cada cambio de fase, cada portadora puede ser modulada independientemente, transmitida sobre la misma banda de frecuencia y separada por demodulación en el receptor. Para mayores niveles de QAM se han desarrollado otros como 16-QAM y 64-QAM, los cuales usan 16 y 64 números diferentes de cambios de fase/amplitud respectivamente.

Para el caso de 16-QAM de la Figura 2.2, se utiliza código Gray para lograr que cada punto de la constelación sólo cambie en un bit con respecto a cualquier punto

adyacente. Así, la probabilidad de error disminuye ya que si se modifica el valor de amplitud, fase o ambos el símbolo sólo contendrá un bit erróneo. Por otro lado, la técnica 64-QAM resulta muy eficiente, ya que soporta velocidades de transmisión por encima de 28 Mbps sobre un canal simple de 6 MHz. Sin embargo, es susceptible a señales de interferencia.

Cuanto mayor sea el orden de modulación más susceptible es al ruido. Por lo tanto, si se quiere una transmisión con una tasa de errores pequeña, se requiere una SNR cada vez más grande a medida que el orden de modulación aumenta.

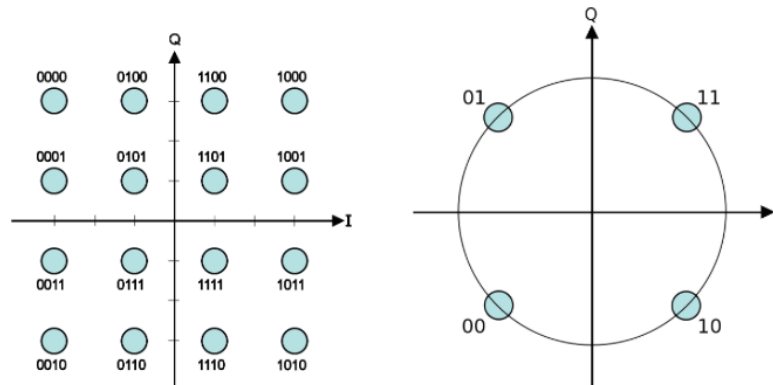


Figura 2.2: Ejemplos de constelaciones 16-QAM (izquierda) y QPSK (derecha) de una modulación digital

En conclusión, la decisión del número de símbolos que se transmiten en cada modulación depende del tipo de canal de transmisión que se utilice. Si es muy ruidoso y con muchas interferencias será más conveniente una modulación con una baja eficiencia espectral, pero que sea segura y no tenga bits erróneos.

2.2.3 Interfaz de radio

La transmisión del enlace descendente de LTE emplea OFDMA [3], variante del OFDM, al considerar la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a diferentes usuarios. Hace uso de un gran número de subportadoras ortogonales muy próximas entre sí que se transmiten en paralelo. El principal objetivo es alcanzar altas velocidades máximas de datos cuando se emplea un gran ancho de banda, en la cual la banda de transmisión se divide en un gran número de subportadoras moduladas con un ancho de banda y ortogonales entre sí.

El diagrama de la Figura 2.3 muestra las principales características de una señal de OFDM tanto en frecuencia como en tiempo. En el dominio de la frecuencia, múltiples subportadoras son cada una moduladas con datos, y en dominio del tiempo, se insertan los intervalos de guarda entre cada uno de los símbolos para evitar la dispersión temporal o interferencia intersimbólica (ISI) en el receptor.

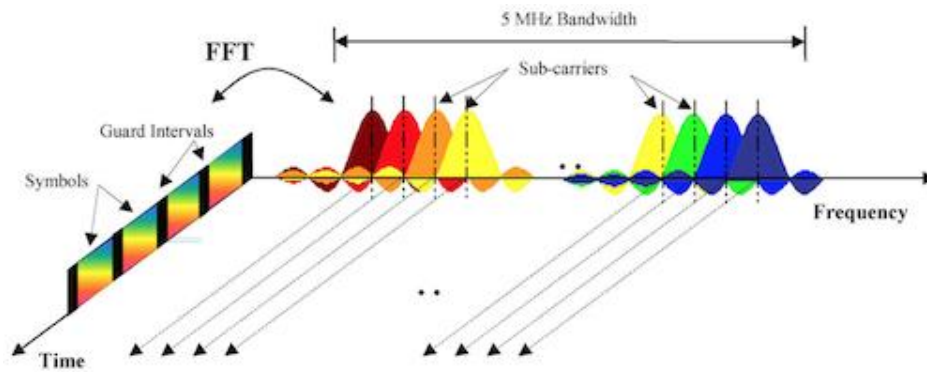


Figura 2.3: Representación de una señal OFDM en frecuencia y en tiempo

Entre otras ventajas destacables están:

- Diversidad multiusuario: la asignación de subportadoras se realiza de manera dinámica. Como el canal radio presentará desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras, y que serán independientes de cada usuario, se puede intentar seleccionar para cada subportadora el usuario que presente un mejor estado de canal, es decir, el que perciba una mejor relación señal a ruido. Con esto se consigue una mayor velocidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. A esta manera de actuar se le denomina *scheduling*.
- Flexibilidad en la banda asignada: se pueden asignar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de las necesidades de servicio requeridas por cada usuario, asignando más o menos subportadoras a cada usuario.
- Elevado grado de utilización de la banda asignada: debido al OFDM la transmisión multiportadora se consigue con una separación mínima entre subportadoras, existiendo una superposición.
- Sencillez de implementación en dominio digital: gracias al uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT e IFFT).

Entre las desventajas se puede destacar, la elevada PAPR y la susceptibilidad frente a errores en frecuencia.

2.2.3.1 Concepto de bloque de recursos

El concepto de bloque de recursos (RB) se define como el mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNodoB a un terminal móvil. Un RB ocupa 180 KHz de banda a 12 subportadoras separadas 15 KHz entre ellas, y en él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud de prefijo cíclico utilizada. La duración de un RB o tiempo de un slot es de 0.5 ms, como indica la Figura 2.4.

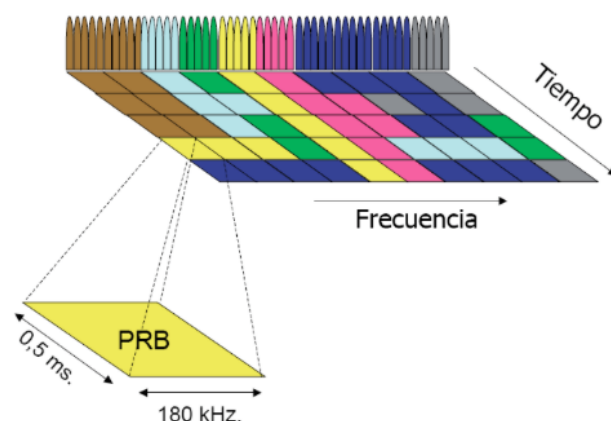


Figura 2.4: Concepto de Radio Bloque (RB)

2.2.3.2 Concepto de prefijo cíclico

Con el objetivo de eliminar los efectos causados por la propagación multicamino, la solución que emplea OFDM es la utilización en transmisión del prefijo cíclico. Consiste en alargar la transmisión de cada símbolo OFDM hasta una duración total $T_p + T_s$ a base de repetir la señal que se envía durante los últimos T_p del símbolo, tal y como se ilustra en la Figura 2.5.

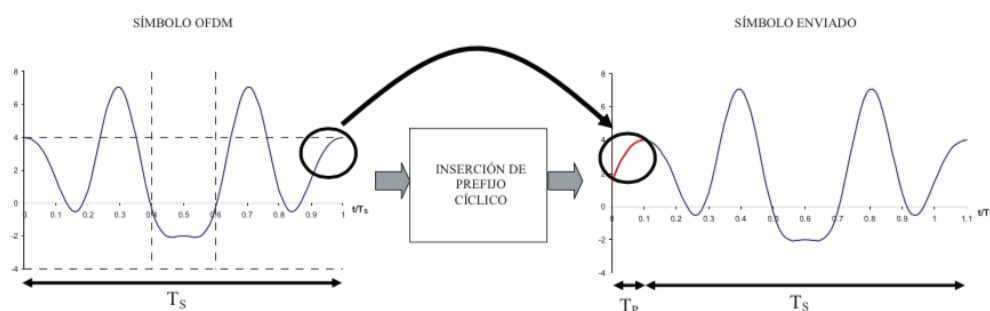


Figura 2.5: Inserción del prefijo cíclico

De este modo, se puede asegurar que las subportadoras se integren en intervalos completos de T_s , lo que permite recuperar la ortogonalidad entre subportadoras y evitar la interferencia entre ellas. Por eso, los diferentes anchos de banda son de aproximadamente un 90% del espaciado entre canales que pueden tomar valores de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.

2.2.4 Modo de funcionamiento: TDD

Al igual que en UMTS, en LTE se han definido los modos FDD y TDD que permiten el uso de bandas de frecuencias pareadas y no pareadas. Aunque el modo FDD proporciona mayor eficiencia, TDD tiene la aplicación adicional de poder ser usado como tecnología de transmisión de acceso, *backhaul*, usado para interconectar redes entre sí utilizando diferentes tecnologías a baja, media o alta velocidad.

Tanto uno como otro serán soportados por los terminales móviles LTE. En la Figura 2.6 se pueden encontrar ambos modelos y ver la diferencia entre ellos [4].

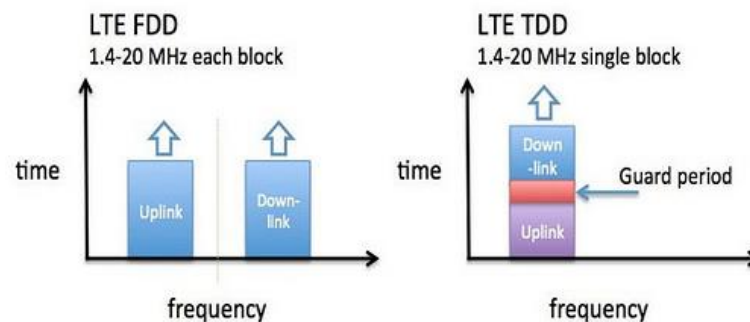


Figura 2.6: Principales modelos de funcionamiento FDD y TDD

Este caso se centrará en el modo TDD, cuya característica principal es que usa la misma banda de frecuencias para transmisión y recepción, pero alterna la dirección de transmisión en el tiempo. Esta es la diferencia más notoria con FDD, donde diferentes frecuencias son usadas para continuas recepciones UE y transmisiones. Soporta varios anchos de banda desde 1.4 MHz hasta 20 MHz, pero dependiendo de la banda de frecuencia puede ser implementado en una banda no pareada o en dos bandas pareadas separadas.

2.2.5 Arquitectura de una red LTE

La arquitectura de una red LTE [3] es estructuralmente mucho más simple que una red GSM o UMTS. Como se puede observar en la Figura 2.7, se muestra la arquitectura completa de una red LTE con su parte de acceso (E-UTRAN) y su parte troncal (EPC), que logra interconectar varias redes de acceso, que en algunas ocasiones pueden ser heterogéneas entre ellas. Por lo tanto, se pueden tener redes de acceso 3GPP o no.

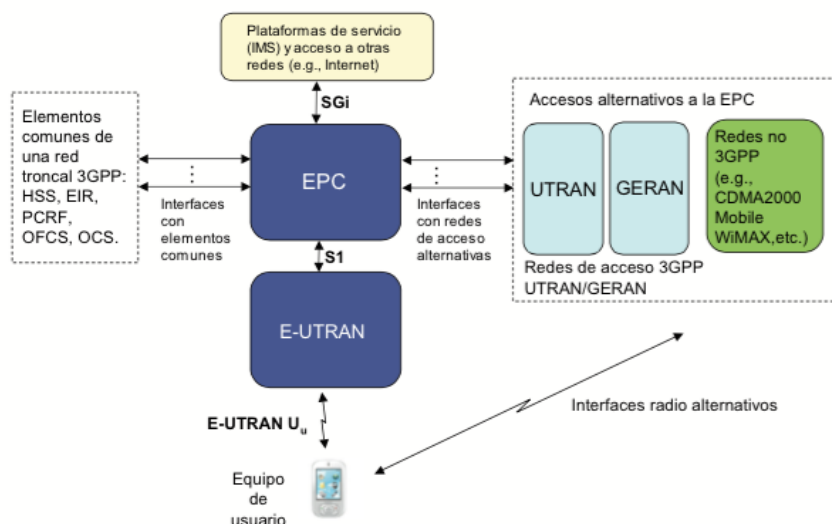


Figura 2.7: Arquitectura de una red LTE

La red de acceso E-UTRAN es una arquitectura basada en el dominio de la conmutación de paquetes (PS), y se asume que los servicios de tiempo real (voz y video) se ofrecen sobre este dominio. Está orientada a una infraestructura que soporta altas velocidades, bajo retardo, orientada a paquetes, y que soporta varias tecnologías de acceso de radio. Está formada por un único nodo llamado eNodeB, el cual está conectado con otros eNodeB tanto para la parte de señalización (MME) como de datos de usuario (SGW), a través de una interfaz denominada X2. Por medio de la misma, se realizan las funciones de *handover* (cambio de frecuencias de trabajo de un terminal móvil que tiene establecida una comunicación) y de coordinación entre los diferentes eNodeB. También proporciona las terminaciones tanto del plano de usuario E-UTRAN como del plano de control hacia el equipo de usuario (UE). Esto contribuye a la arquitectura plana de LTE.

E-UTRAN está conectado al EPC a través de la interfaz S1, que conecta los eNodeB a dos elementos: el MME y el SGW, como se puede apreciar en la Figura 2.7.

La red troncal EPC consiste únicamente en una red de paquetes basada en protocolo IP. Además, se basa en la separación entre un plano de control y un plano de usuario, en la capacidad para asignar direcciones IP independientes y otros atributos, en que la puerta de enlace SGW sea el punto de anclaje que conecte los eNodeB a la red principal y completa las políticas de facturación y normas de calidad de servicio entre otros.

2.3 Trenes de Alta Velocidad (TAV)

Este escenario se realiza sobre Trenes de Alta Velocidad (TAV), conocidos como trenes rápidos o trenes bala, que alcanzan velocidades superiores a 200 km/h sobre líneas existentes actualizadas, y 250 km/h sobre líneas específicamente diseñadas para tal efecto.

AVE es la marca comercial utilizada por la compañía ferroviaria española Renfe Operadora para sus trenes de alta velocidad de mayor gama. Son trenes [11] que circulan a una velocidad máxima de 310 km/h por líneas de ancho internacional (1.435 mm) electrificadas a 25 kV 50 Hz en recorridos de larga distancia.



Figura 2.8: Tren de alta velocidad (TAV)

La altura real del tren que se usará en el Anexo C será de 3.89 metros, pero hay que tener en cuenta que el rail tiene una medida de 10 cm aproximadamente como aparece en la Figura 2.8. Por tanto, la altura final es de cuatro metros. Hay que tener en cuenta que estas medidas pueden variar según el modelo ya que son para un tren específico, en este caso es el llamado AVE Serie 103.

2.4 Estado del arte

Actualmente, el nuevo estándar de telecomunicaciones conocido como LTE es el que presenta mayor crecimiento a nivel mundial. Los operadores lo están desarrollando debido a los beneficios que trae consigo, ya que promete un aumento en el ancho de banda, mayor capacidad de red, reducción de costes, mejor uso del espectro y una menor latencia entre otros. Aunque LTE es una tecnología que presenta grandes beneficios, no está implantada en todos los escenarios de este entorno. En situaciones como una red de autopistas o en las líneas de trenes de alta velocidad todavía no se ha desarrollado, aunque actualmente se realizan estudios de viabilidad para el sistema de comunicación móvil ferroviario. En él, se evalúan las características específicas de los servicios y las capacidades de LTE [5].

Se destaca un estudio realizado en China cuyo objetivo principal es la evaluación de LTE en condiciones reales usando un modelo de canal híbrido de alta velocidad ferroviaria en 3GPP y modelos de gran escala basados en un grupo de mediciones en Zhengzhou-Xian, línea comercial en China. El artículo evalúa la BER y PSD de LTE para un canal de ferrocarril de alta velocidad. Incluye el análisis del efecto Doppler causado por la velocidad del transmisor y el receptor y la interferencia de trayectos múltiples debido a las difracciones de terrenos en la zona de cobertura del servicio radio, demostrando el potencial de LTE para un entorno ferroviario [6].

En España, las tres principales empresas tecnológicas, Telefónica, Indra e Hispasat, están trabajando en la implantación de la conexión inalámbrica en el AVE. Telefónica se impuso a Vodafone, puesto que defiende una conexión a Internet en el tren de alta velocidad de 4G LTE complementada con señal de satélite. Se prevé que este servicio de conexiones Wi-Fi se habrá implantado en los AVE a lo largo de este año, aunque el servicio no estará totalmente integrado en sus trenes hasta dentro de dos años y medio. El proyecto consta de la instalación tanto en los trenes como en las estaciones. En los trenes, se instalarán antenas en los vagones y balizas de señal a lo largo de la infraestructura. Las antenas conectarán a la red 4G de la operadora que se haga con el proyecto o directamente por satélite en zonas donde no exista esa cobertura o sea de mala calidad [7].

3 Sistemas LTE en AVE

3.1 Introducción

En este capítulo se analizarán los puntos más significativos de este escenario, el cual se desarrolla en un AVE. Se realizará un análisis detallado, incluido la tasa binaria por sectores, el punto de ruptura o *breakpoint*, entre otros. También se tendrán en cuenta los factores atenuantes que afecten a la señal.

3.2 Modelos de propagación

Un modelo de propagación [12] es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado. Generalmente, estos modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos (o estadísticos), teóricos o incluso semi-empíricos, esto es el uso de dos modelos de propagación diferentes dentro de una misma banda de frecuencia.

En concreto los modelos empíricos se basan en mediciones y los modelos teóricos en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio. Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de RF pueda tener entre una BS y una MS. La ventaja de conocer las características de la trayectoria entre transmisor y receptor es evaluar la viabilidad de los proyectos. De esta manera, se podrá realizar un análisis sobre las distintas necesidades y costes de los sistemas requeridos.

Para este escenario se hace uso del conocido modelo de propagación *Dual-Slope*, modelo que depende tanto de la distancia entre transmisor y receptor como de las pérdidas de propagación, las cuales se dividen en dos sectores. Esto se llevará a cabo para tener en cuenta las pérdidas por *shadowing* (fenómeno que se produce cuando la línea de vista entre transmisor y receptor se obstruye debido a los obstáculos que pueden estar en el trayecto de propagación) ya que pueden producir cambios en la señal provocando cambios bruscos en el nivel de potencia recibida en el terminal móvil, tanto en el espacio como en el tiempo. Aunque estas pérdidas puedan ser reducidas, es necesario incluir un corrector en el cálculo de la SINR para que se tengan en cuenta estas variaciones de la señal sobre el valor proporcionado por los modelos de propagación.

Primero, se definen los exponentes de propagación, $n1$ y $n2$, hasta un punto conocido como *breakpoint*, en el programa es Rb , y se calculan las pérdidas de propagación como aparecen en la Ecuación 3.1:

- Si $d < Rb$

$$Lp1 = L1m + 10 * n1 * \log_{10} Rb + 10 * n1 * \log_{10} \left(\frac{d}{Rb} \right) + \varepsilon_{antesRb}$$

- En cualquier otro caso (3.1)

$$Lp1 = L1m + 10 * n1 * \log_{10} Rb + 10 * n2 * \log_{10} \left(\frac{d}{Rb} \right) + \varepsilon_{despuésRb}$$

donde d es la distancia entre la BS de la micro celda y el MS, $\varepsilon_{antesRb}$ y $\varepsilon_{despuésRb}$ son las variables aleatorias Gaussianas de media cero y una desviación típica σ_1 y σ_2 respectivamente que representan el fenómeno de *shadowing*, $L1m$ son las pérdidas por luna del vehículo que se calculan como:

$$L1m (dB) = 20 * \log_{10} \left(\frac{4 * \pi}{\lambda} \right) \quad (3.2)$$

y el *breakpoint* como:

$$Rb = \frac{4 * h_t * h_{bs}}{\lambda} \quad (3.3)$$

donde h_t es la altura de la antena del MS, h_{bs} es la altura de la antena de la BS y λ la longitud de onda. Todo ello en metros.

En la Tabla 3.1 se detallan todos los valores utilizados para llevar a cabo el cálculo de las pérdidas de propagación:

Tabla 3.1: Valores para el cálculo de las pérdidas de propagación

Rb	256 – 832 m por el cambio de la frecuencia de trabajo
d	1000 – 4650 m rango donde se mantiene la cobertura
$n1$	2, valor estándar
$n2$	4, valor estándar
$\varepsilon_{antesRb}$ ($\varepsilon_{antesRb}$)	2.33333*3 = 7, valores de la distribución normal Gaussiana
$\varepsilon_{despuésRb}$ ($\varepsilon_{despuésRb}$)	2.33333*6 = 14, valores de la distribución normal Gaussiana
λ	0.1154 – 0.375 m por el cambio de la frecuencia de trabajo
h_t	4 m, altura del vagón tomando en cuenta el rail
h_{bs}	6 m, valor estándar

Los valores de $n1$ y $n2$ dependen del entorno en el que se encuentren, y solo se toma en cuenta las pérdidas por luna del vehículo. Además se define el perímetro de cobertura a través de la distancia entre las BS.

3.3 Cálculo de la tasa binaria del downlink

Antes de comenzar a explicar lo referente a la tasa binaria es necesario desarrollar previamente el programa completo.

Comienza con 12 subportadoras equidistantes a 15 KHz, dando como resultado una longitud total del bloque de 180 KHz. Estos tamaños de los bloques de datos son los que determinan la velocidad de datos del usuario LTE como bien se puede observar a continuación:

- Separación entre portadoras (Sep_portadoras) = 15000 Hz
- Longitud del bloque (Longitud_Rb) = 180000 Hz
- Subportadoras por RB (SC_por_Rb) = Longitud_Rb/Sep_portadoras

El número de subportadoras disponibles varía en función del ancho de banda del sistema, tal como se indica en la siguiente Tabla 3.2:

Tabla 3.2: Número de RBs y subportadoras disponibles según el ancho de banda

Ancho de banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de RBs	6	15	25	50	75	100
Número de subportadoras	72	180	300	600	900	1200

El número de subportadoras disponibles y el número de RBs están relacionados. Por tanto, el número de subportadoras es 12 veces el número de RBs, aunque hay que considerar que la portadora central del ancho de banda disponible no se utiliza para transmitir información, sino para facilitar los mecanismos de ajuste y sincronización en frecuencia del receptor.

Para realizar el cálculo del número de RBs que caben en un determinado ancho de banda hay que tener en cuenta, que del ancho de banda nominal para la transmisión LTE, un 10% se emplea en señalización. Por lo tanto, el ancho de banda real para datos es del 90% del total disponible.

- Ancho_banda_nominal = 20 MHz
- Ancho_banda_real = 0.9 * Ancho_banda_nominal
- Num_SubRb = Ancho_banda_real/ 0.015

A continuación se definen los parámetros de la antena, englobando tanto la potencia como la ganancia:

```
Ptx = 2; % Potencia transmisora en W
Ptx = 10*log10(Ptx); % Potencia transmisora en dBW
Ptx = 30 + Ptx; % Potencia transmisora en dBm
Gtx = 12; % Nivel de lóbulo principal del transmisor
Grx = 0; % Nivel de lóbulo principal del receptor
SLL = 20; % Nivel de SLL de la antena transmisora
```

```

NF = 7; % Factor de ruido
N = -114 + 10*log10(Ancho_banda_nominal*0.92) + NF; % Potencia de ruido

```

Todos los valores se encuentran dentro de los recomendados por LTE y para el cálculo de la potencia de ruido en vez de multiplicarlo por 0.9, se hace por 0.92 para incluir el ancho de banda del filtro FI.

Como se ha mencionado en el apartado 3.2, se tienen que definir los exponentes de propagación para fijar el *breakpoint*. Para ello se debe especificar tanto la altura de la BS como la del MS:

```

n1 = 2; % Exponentes de propagación
n2 = 4;
ht = 4; % Altura del vehículo en m
hbs = 6; % Altura de la estación base en m
Rb = 4*ht*hbs/lambda; % Breakpoint en m

```

En lo que a pérdidas con respecto al vehículo se refiere, como no se produce ninguna interacción con el usuario solo se producirán pérdidas por luna del vehículo, por ello aplicamos la Ecuación 3.2 del apartado anterior.

Aunque se use la tecnología LTE, las antenas que se utilizarán en este programa son las conocidas como SIMO. Por tanto, para la tasa binaria se escalará por uno. Sin embargo, si se utilizara MIMO 2x2 o 4x4 se escalaría por 2 o 4 respectivamente.

En el escenario que se estudia con entornos abiertos y situaciones estáticas sin movimientos del usuario, el efecto del multitrayecto y el desplazamiento Doppler es reducido. Sin embargo, es necesario un término corrector para el efecto *shadowing* en el cálculo de la SINR que tenga en cuenta estas variaciones de la señal.

- Épsilon antes del *breakpoint*, z en la distribución $N(0,1)$:
 $\text{epsilon_antesRb} = 2.33333*3$
- Épsilon después del *breakpoint*, z en la distribución $N(0,1)$:
 $\text{epsilon_despuesRb} = 2.33333*6$

Ese valor es porque solo el 1% restante se puede ver afectado por algún tipo de obstáculo, ya sea edificios cercanos o algún otro elemento próximo. Por tanto, el valor que corresponde al 99% disponible es el de 2.33 como bien se puede apreciar en la siguiente Tabla 3.3 [8]:

Tabla 3.3: Distribución normal $N(0,1)$

Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064

En relación al cálculo de las pérdidas, éstas se llevan a cabo dentro de un bucle para realizarlo en todo el sector R, que en este caso será cada 1000 metros. Aunque en el capítulo 4 se realizará un análisis más exhaustivo.

```
for d = 1:R;
    %Cálculo del ángulo de propagación
    altural = hbs-ht;
    z = atand(altural/d);
    fd = (v/lambda)*cosd(z);      % Frecuencia de Doppler en Hz
    delta = fd/Sep_portadoras;
```

En esta parte del código se necesitará calcular el valor de delta para poder evaluar la SINR a partir de la SNR, pero para ello hay que tener en cuenta el efecto Doppler, conocido como la variación de la longitud de onda de cualquier tipo de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento.

La relación señal a ruido medida en el receptor móvil (SINR) es la que determina la calidad del enlace radioeléctrico y la velocidad alcanzable. Un valor de SINR determina el máximo esquema de modulación y codificación (MCS) utilizable en transmisión. Cuanto mayor sea el esquema MCS mayor será la eficiencia espectral del enlace y por tanto la tasa, pero mayor será la calidad requerida en el enlace. De la Ecuación 3.4 se puede calcular esa SINR:

$$SINR_m = \frac{\left| \frac{\sin(\pi\Delta)}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\Delta\right)} \right|^2}{1 - \left| \frac{\sin(\pi\Delta)}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\Delta\right)} \right|^2 + \frac{1}{SNR}} \quad (3.4)$$

En el código, la ecuación anterior se realiza por partes, dando como resultado la Ecuación 3.5 :

$$SINR_m = \frac{\left| \frac{Aa}{Bb} \right|^2}{1 - \left| \frac{Aa}{Bb} \right|^2 + \frac{1}{SNR}} \quad (3.5)$$

```
Aa = sin(pi*delta); % SINRm por partes
Bb = Num_SubRb*sin(pi*(delta/Num_SubRb));
Cc = (Aa/Bb)^2;
```

A continuación, se realiza el cálculo de las pérdidas y las interferencias en varios sectores de este escenario, ya que la antena que está ofreciendo la cobertura al sector se puede ver afectada por otra con la misma frecuencia.

```
if d < Rb
    Lp1 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n1*log10(d/Rb)+epsilon_antesRb;
else
    Lp1 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n2*log10(d/Rb)+epsilon_despuesRb;
end

Lp2 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n2*log10((2*R+d)/Rb);
Lp3 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n2*log10((4*R+d)/Rb);
Lp4 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n2*log10((6*R+d)/Rb);
Lp5 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n2*log10((8*R+d)/Rb);
Lp6 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n2*log10((2*R-d)/Rb);
Lp7 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n2*log10((4*R-d)/Rb);
Lp8 = L1m+10*n1*log10(Rb)+10*n2*log10((8*R-d)/Rb);

% Potencia de señal e interferencias (incluye ruido) en unidades
naturales:
Srx = Ptx + Gtx + Grx - Lp1 - Lextra;
Icc1 = Ptx + Gtx + Grx - Lp2 - Lextra - epsilon_despuesRb;
Icc2 = Ptx + Gtx + Grx - Lp3 - Lextra - epsilon_despuesRb;
Icc3 = Ptx + Gtx + Grx - Lp4 - Lextra - epsilon_despuesRb;
Icc4 = Ptx + Gtx + Grx - Lp5 - Lextra - epsilon_despuesRb;
Icc5 = Ptx + Gtx - SLL + Grx - Lp6 - Lextra - epsilon_despuesRb;
Icc6 = Ptx + Gtx - SLL + Grx - Lp7 - Lextra - epsilon_despuesRb;
Icc7 = Ptx + Gtx - SLL + Grx - Lp8 - Lextra - epsilon_despuesRb;

% Potencia de señal e interferencias (incluye ruido) en dBs:
Srx = 10^(Srx/10);
Icc1 = 10^(Icc1/10);
Icc2 = 10^(Icc2/10);
Icc3 = 10^(Icc3/10);
Icc4 = 10^(Icc4/10);
```

```

Icc5 = 10^(Icc5/10);
Icc6 = 10^(Icc6/10);
Icc7 = 10^(Icc7/10);
N1 = 10^(N/10);

```

Se hace uso de la Ecuación 3.4 para realizar el cálculo de la SINR a partir de la SNR, ambos valores en dBs:

```

SNR = Srx/(N1+Icc1+Icc2+Icc3+Icc4+Icc5+Icc6+Icc7);
SINR(d) = 10*log10(Cc/(1-Cc+(1/SNR)));

```

Para medir el comportamiento del canal *downlink* se hace uso de la relación SINR-CQI- Tasa binaria, determinando así la calidad que requiere el enlace y que asegure una tasa binaria operando a una tasa de error aceptable. El 3GPP definió el indicador de calidad, CQI, necesaria para optimizar los procedimientos de asignación de recursos en el enlace *downlink*. Define entre otros la modulación, la tasa de codificación, el número de canales físicos o la posible reducción de potencia.

```

    %Tasa binaria según la SINR
    if SINR(d) < -3.4
        Tb(d) = 0;
    elseif SINR(d) < -2.3
        Tb(d) = 0.34;
    elseif SINR(d) < -1.4
        Tb(d) = 0.46;
    elseif SINR(d) < -0.4
        Tb(d) = 0.58;
    elseif SINR(d) < 0.8
        Tb(d) = 0.72;
    elseif SINR(d) < 2.7
        Tb(d) = 0.9;
    elseif SINR(d) < 5.3
        Tb(d) = 1.1;
    elseif SINR(d) < 6.8
        Tb(d) = 1.28;
    elseif SINR(d) < 7.5
        Tb(d) = 2;
    elseif SINR(d) < 8.5
        Tb(d) = 2.2;
    elseif SINR(d) < 10
        Tb(d) = 2.48;
    elseif SINR(d) < 11.4
        Tb(d) = 2.88;
    elseif SINR(d) < 14
        Tb(d) = 3.2;
    elseif SINR(d) < 14.5
        Tb(d) = 3.84;
    elseif SINR(d) < 15.8
        Tb(d) = 4.08;
    elseif SINR(d) < 17.1
        Tb(d) = 4.56;
    elseif SINR(d) < 19.8
        Tb(d) = 4.92;
    else
        Tb(d) = 5.46;
    end

end %Fin de bucle

```


Estos valores se obtienen de la Tabla 3.4, la cual muestra la relación entre la tasa de codificación y la modulación asociada a cada MCS [8].

Tabla 3.4: Tasa binaria y SINR según la tasa de codificación

MCS	Modulación	Orden de modulación	Tasa de codificación	Tasa binaria (Mbps/Hz)	SINR (dB)
0					<-3.4
1	QPSK	2	0.17	0.34	-3.4
2	QPSK	2	0.23	0.46	-2.3
3	QPSK	2	0.29	0.58	-1.4
4	QPSK	2	0.36	0.72	-0.4
5	QPSK	2	0.45	0.9	0.8
6	QPSK	2	0.55	1.1	2.7
7	QPSK	2	0.64	1.28	5.3
8	16QAM	4	0.5	2	6.8
9	16QAM	4	0.55	2.2	7.5
10	16QAM	4	0.62	2.48	8.5
11	16QAM	4	0.72	2.88	10
12	16QAM	4	0.8	3.2	11.4
13	64QAM	6	0.64	3.84	14
14	64QAM	6	0.68	4.08	14.5
15	64QAM	6	0.76	4.56	15.8
16	64QAM	6	0.82	4.92	17.1
17	64QAM	6	0.91	5.46	19.8

Dependiendo del tipo de modulación y de la tasa de codificación va a tener una determinada tasa binaria o SINR.

Para finalizar, se calcula la tasa binaria total haciendo uso de la tasa binaria según la SINR, el ancho de banda real, es decir, el 90% del nominal y del tipo de antena que se esté utilizando de la cual se darán más detalles en los Anexos A y B.

```

sum = 0;
for d = 1:R;
    Tbfinal(d) = Tb(d) * Ancho_banda_real * scale;
    sum = sum + Tbfinal(d);
end

Tbfinal_media = sum/R

```

4 Resultados

En este capítulo se lleva a cabo el análisis de los resultados tanto de la cobertura de la red como de la capacidad del sistema ante la demanda de tráfico de los usuarios. La presencia de una mayor carga de tráfico limita el comportamiento del sistema, ya que los recursos radio para atender la demanda son limitados. De igual modo se genera un mayor nivel de interferencia entre las celdas a medida que aumenta la carga de las mismas.

A continuación se muestran los resultados de este programa utilizando para ello la herramienta Matlab, cambiando distintos valores así como la banda de frecuencias o el SLL, teniendo en cuenta las imperfecciones del canal que generan fenómenos que deterioran la señal que llegan al receptor. Los multitrayectos, el *shadowing*, el efecto Doppler y el efecto de la velocidad de desplazamiento del móvil son los factores más importantes que generan el llamado *Fading Channel*.

Este análisis se va a centrar en los siguientes datos de la Tabla 4.1, los cuales se modificarán:

Tabla 4.1: Valores específicos para el cálculo del SINR y la tasa binaria media

Frecuencia	0.8-2.6 GHz
Ancho de banda (BW)	20 MHz
Velocidad	350 km/h
SLL	15 y 20 dB
R	1000-4650 m

4.1 SINR

En este apartado se realiza el análisis de la SINR a partir de la carga de tráfico. Este cálculo proporciona una idea aproximada de la cobertura y de la demanda de recursos de la red.

4.1.1 Banda de 800 MHz

En la Figura 4.1 se comprueba que el valor inicial del SINR es de 37.06 dB, y no es hasta pasados los primeros cinco metros cuando este valor no se estabiliza en torno a los 30 dB. Transcurridos los primeros 256 metros se produce el fenómeno ya mencionado en el capítulo 3, *breakpoint*, produciéndose el cambio de exponente de propagación de 2 a 4.

Una vez que se produce este cambio de exponente de propagación se comprueba que el nivel de SINR empieza a disminuir de forma más rápida. Esto se produce por los factores que deterioran la señal ya mencionados al comienzo de este capítulo. Llegando al final de la distancia a los 15 dB, se observa con la Tabla 3.4 que se dispone de suficiente cobertura.

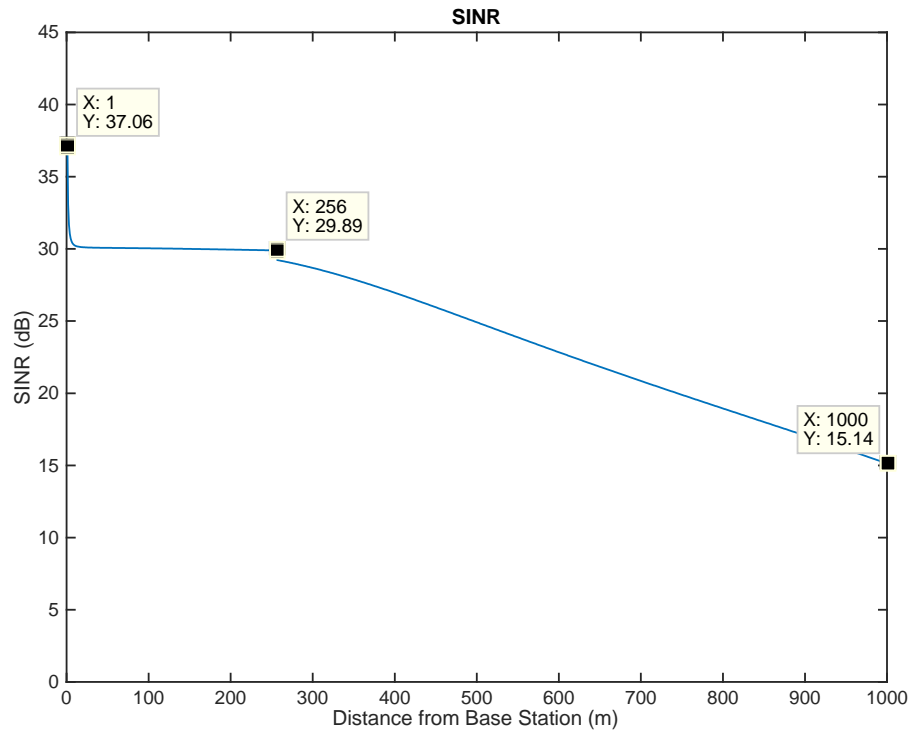


Figura 4.1: Cálculo SINR para $R = 1000$ m a 800 MHz con respecto a la BS

En la Figura 4.2 se comprueba cuál es la distancia máxima a la que el SINR es distinto de cero, rondando los 3700 metros.

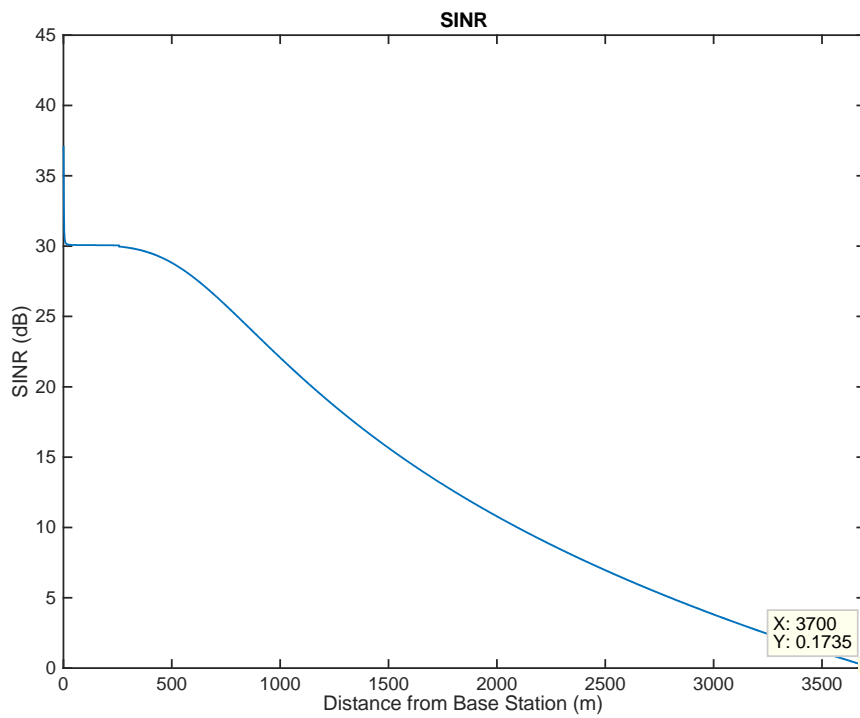


Figura 4.2: Cálculo SINR con R máxima con respecto a la BS

4.1.2 Banda de 2.6 GHz

En la Figura 4.3 se observa que el valor inicial del SINR es de 26.82 dB y hasta pasados los cinco primeros metros no se estabiliza en torno a los 20 dB. En este caso el *breakpoint* no se produce hasta los 831 metros, donde cambia el exponente de propagación a 4.

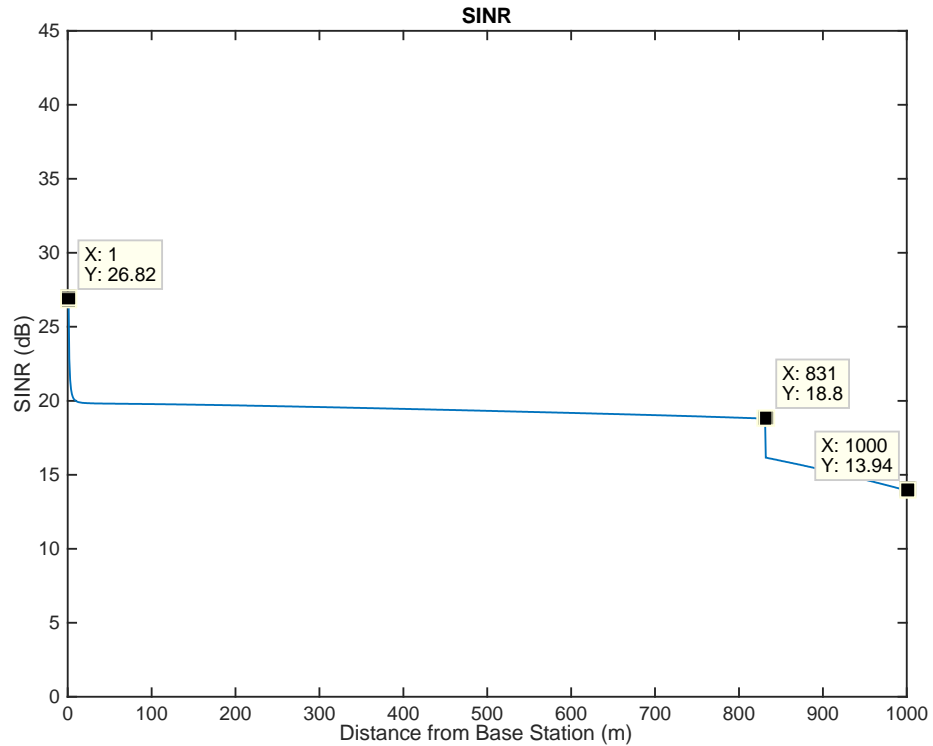


Figura 4.3: Cálculo SINR para $R = 1000$ m a 2.6 GHz con respecto a la BS

En este caso, el cambio de exponente se produce más tarde y por tanto la disminución no es tan notable, alcanzando los 14 dB.

La distancia máxima en la que el SINR es cero no ha cambiado con respecto a la banda de 800 MHz, siendo esta de 3700 metros con respecto a la BS.

4.2 Tasa binaria

En esta sección se analizará la tasa binaria y los factores que hay que tener en cuenta. Este caso no se van a tener en cuenta los fenómenos atenuantes. Sin embargo, sí va a afectar en el modo de funcionamiento TDD dependiendo de la banda de frecuencia en la que se encuentre.

4.2.1 Banda de 800 MHz

Aplicando los datos correspondientes se muestran los cálculos en la Tabla 4.2 de la tasa binaria media por sector, con SLL de 15 dB y un ancho de banda de 20 MHz, pudiendo observar que cuanto menos distancia haya entre las antenas mayor será la tasa binaria.

Tabla 4.2: Tasa binaria media a 800 MHz y SLL 15 dB

SLL = 15 dB			
R (metros)	Tasa binaria media por sector (Mbps)	R (metros)	Tasa binaria media por sector (Mbps)
1000	92.3994	3250	64.6324
1250	91.2707	3350	63.2715
1500	89.5200	3450	61.9721
1750	86.9955	3550	60.7364
2000	83.8597	3650	59.4777
2250	80.4170	3750	58.2845
2350	78.9511	3850	57.1207
2450	77.2773	3950	55.9702
2550	75.5284	4050	54.8780
2650	73.8512	4150	53.7818
2750	72.1465	4250	52.7375
2850	70.5116	4350	51.6946
2950	68.9576	4450	50.6882
3050	67.4752	4550	49.7281
3150	66.0642	4650	48.6777

En la Figura 4.4 se aprecian mejor los resultados haciendo uso de una gráfica. Podemos ver la disminución de la tasa binaria a medida que la distancia de la BS aumenta.

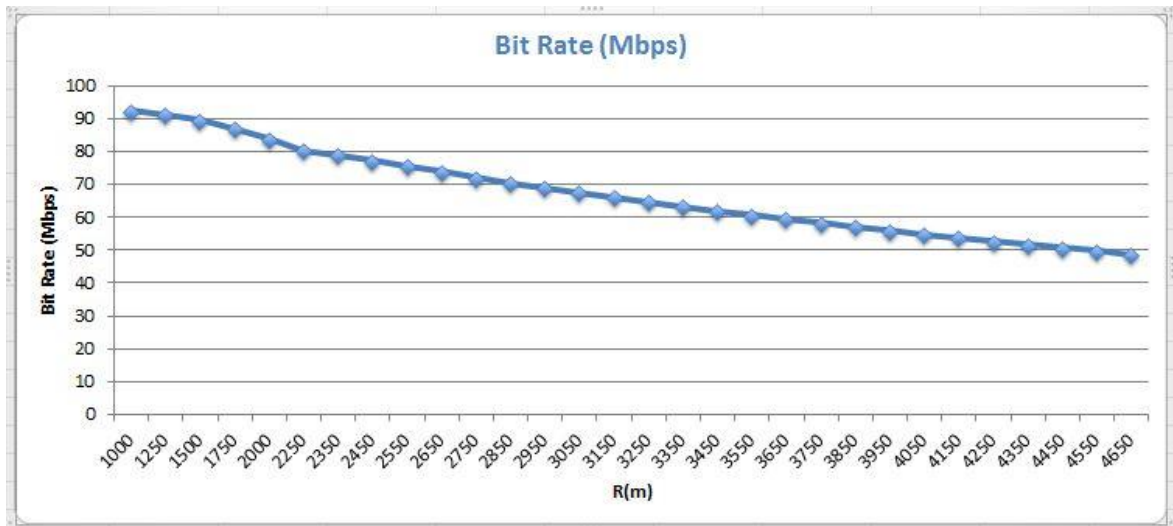


Figura 4.4: Evolución de la tasa binaria media a 800 MHz y SLL 15 dB,

En la Figura 4.5 se puede observar que en el primer metro no se produce la transmisión de ningún bit. A partir de los dos metros, la tasa binaria permanece constante (unos 98 Mbps) hasta los 707 metros, en los que empieza a disminuir de manera escalonada debido al cambio de la tasa de codificación y a la distancia.

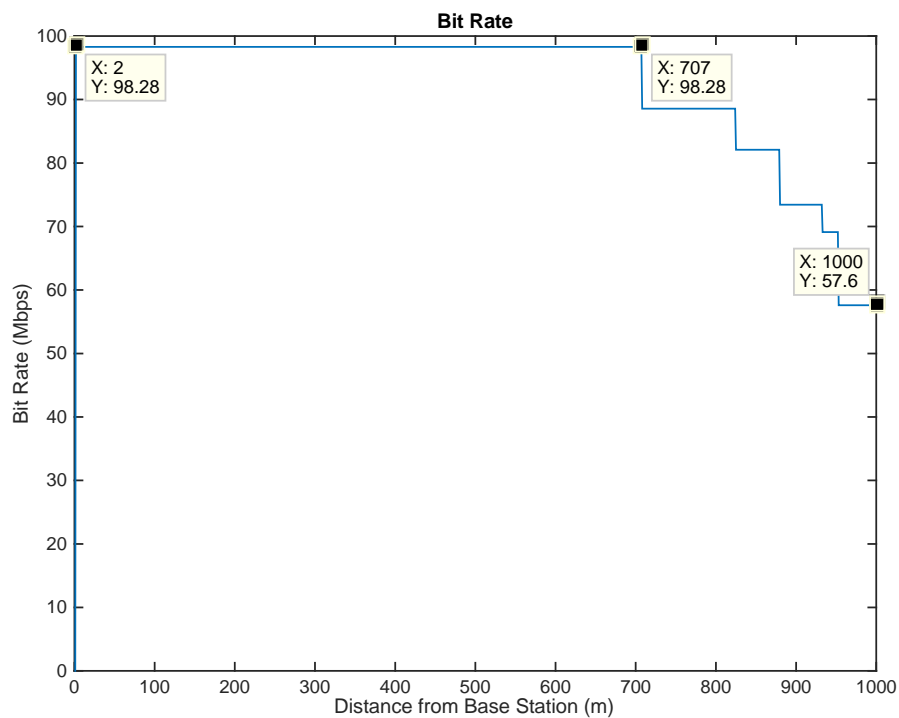


Figura 4.5: Representación de la tasa binaria en 800 MHz, $R = 1000$ m respecto a la BS con SLL 15 dB

Del mismo modo se calcula la tasa binaria media por sector en la misma banda de frecuencias y con el mismo ancho de banda. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados cuando se emplea un SLL de 20 dB :

Tabla 4.3: Tasa binaria media a 800 MHz y SLL 20 dB

SLL = 20 dB			
R (metros)	Tasa binaria media por sector (Mbps)	R (metros)	Tasa binaria media por sector (Mbps)
1000	94.9342	3250	64.7917
1250	93.7112	3350	63.3995
1500	91.2055	3450	62.0797
1750	88.2459	3550	60.8311
2000	84.7935	3650	59.5681
2250	81.0365	3750	58.3558
2350	79.5219	3850	57.1913
2450	77.9637	3950	56.0353
2550	76.1048	4050	54.9321
2650	74.2990	4150	53.8336
2750	72.5421	4250	52.7807
2850	70.8248	4350	51.7365
2950	69.2012	4450	50.7255
3050	67.6732	4550	49.7626
3150	66.2291	4650	48.7146

Esta disminución de la tasa binaria media se aprecia en la Figura 4.6:

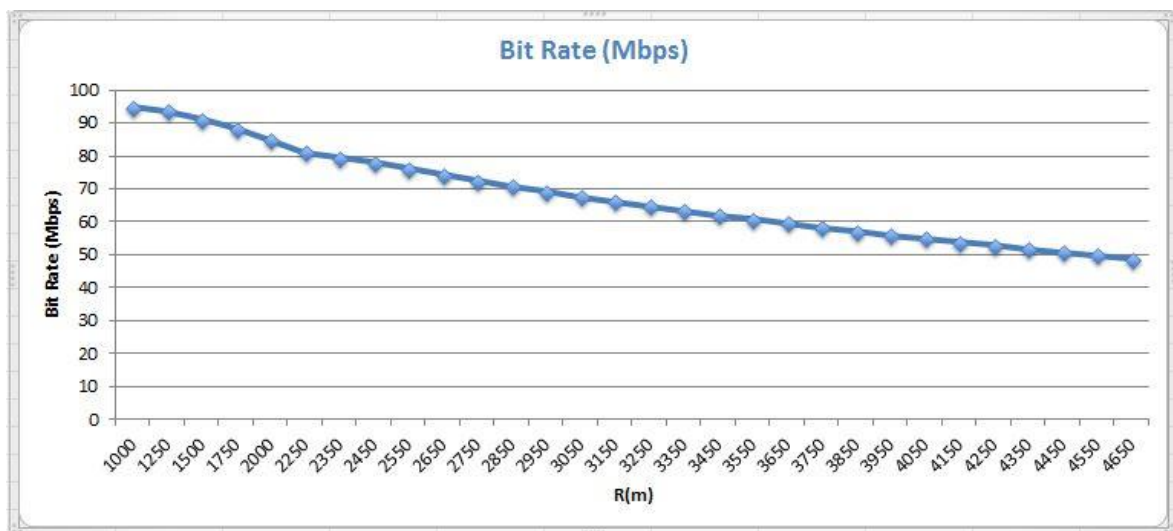


Figura 4.6: Evolución de la tasa binaria media a 800 MHz y SLL 20 dB,

Este caso con respecto al anterior varía en que la distancia a la que la tasa binaria comienza a disminuir es mayor y la tasa binaria en 1000 metros también es mayor, como se muestra en la Figura 4.7:

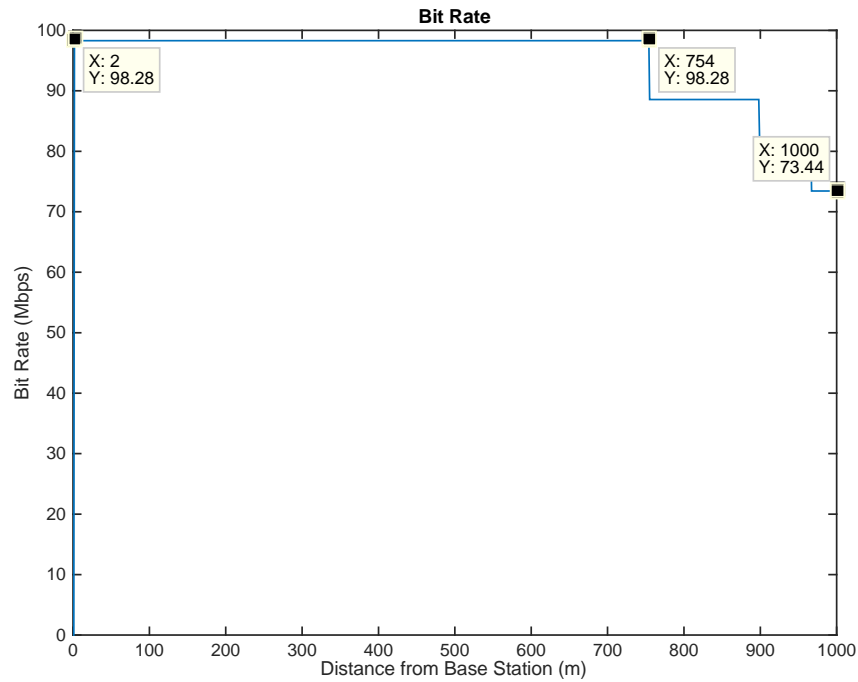


Figura 4.7: Representación de la tasa binaria en 800 MHz, $R = 1000$ m respecto a la BS con SLL 20 dB

Finalmente, en la Figura 4.8 se puede encontrar cuál es la distancia máxima a la que se sigue transmitiendo datos, y es de aproximadamente 4570 metros:

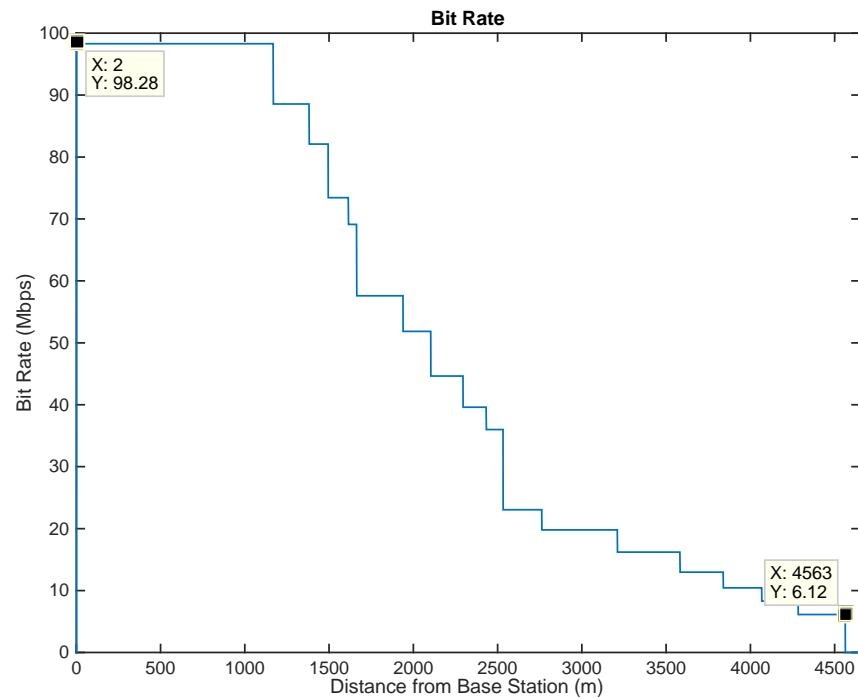


Figura 4.8: Representación de la tasa binaria con R máxima de la BS a 800 MHz

4.2.2 Banda de 2.6 GHz

Ahora se procede a realizar el mismo análisis pero en una banda de frecuencia de 2.6 GHz tanto para un SLL a 15 dB como a 20 dB. En la Tabla 4.4 se distinguen los valores correspondientes con un SLL de 15 dB:

Tabla 4.4: Tasa binaria media a 2.6 GHz y SLL 15 dB

SLL = 15 dB			
R (metros)	Tasa binaria media por sector (Mbps)	R (metros)	Tasa binaria media por sector (Mbps)
1000	84.9499	3250	59.7087
1250	82.9437	3350	58.4899
1500	81.4771	3450	57.3260
1750	79.4277	3550	56.1977
2000	76.8195	3650	55.0618
2250	73.8342	3750	53.9820
2350	72.5595	3850	52.9141
2450	70.9783	3950	51.8695
2550	69.4388	4050	50.8692
2650	67.9308	4150	49.8672
2750	66.4131	4250	48.9099
2850	64.9635	4350	47.9518
2950	63.5894	4450	47.0274
3050	62.2722	4550	46.1253
3150	60.9933	4660	45.1527

Para comprobar mejor estos datos, en la Figura 4.9 se muestra esa disminución de la tasa binaria media a medida que se aleja de la BS:

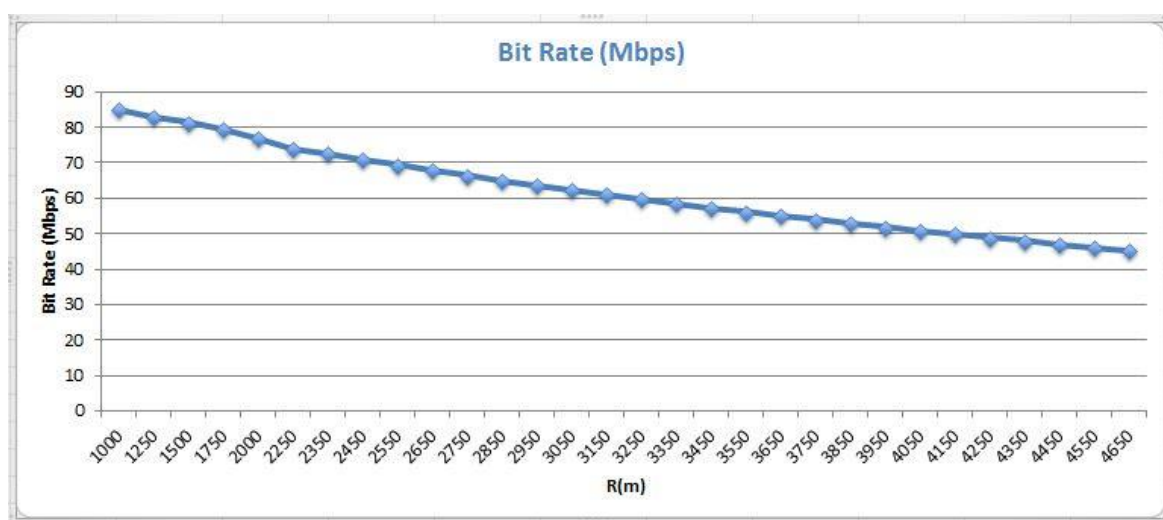


Figura 4.9: Evolución de la tasa binaria media a 2.6 GHz y SLL 15 dB

La Figura 4.10 ilustra como también en el primer metro no se produce transmisión de ningún bit. A partir del segundo metro permanece constante (a 88 Mbps) hasta los 831 metros que empieza a variar, finalizando en los 1000 metros con 57.6 Mbps.

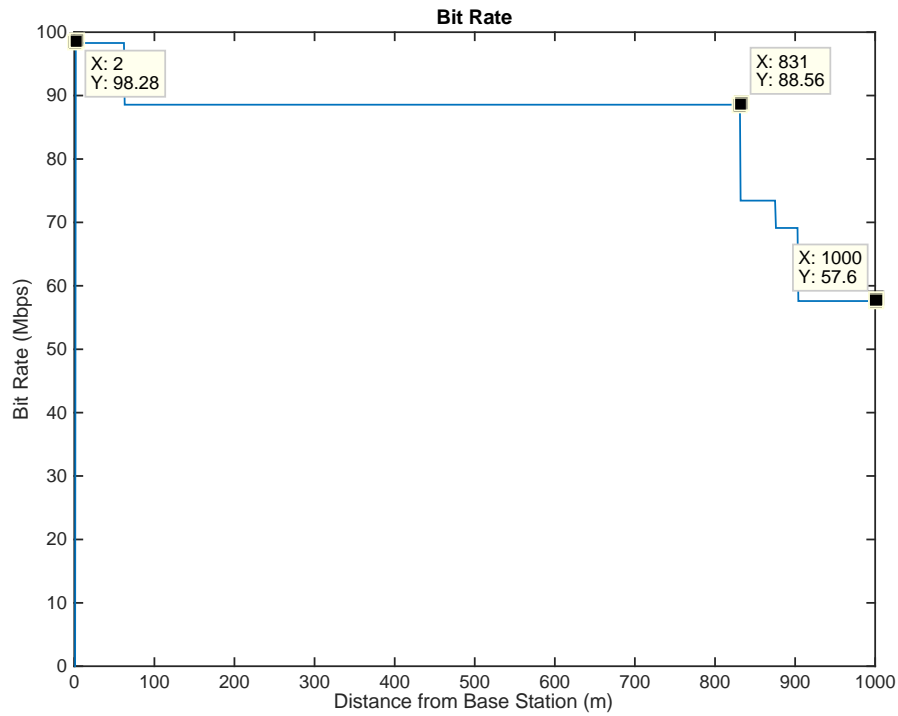


Figura 4.10: Representación de la tasa binaria en 2.6 GHz, $R = 1000$ m respecto a la BS con SLL 15 dB

La Tabla 4.5 se corresponde con los datos de la tasa binaria media cambiando el SLL a 20 dB:

Tabla 4.5: Tasa binaria media a 2.6 GHz y SLL 20 dB

SLL = 20 dB			
R (metros)	Tasa binaria media por sector (Mbps)	R (metros)	Tasa binaria media por sector (Mbps)
1000	86.6491	3250	59.8540
1250	84.6985	3350	58.6000
1500	82.7599	3450	57.4178
1750	80.3899	3550	56.2909
2000	77.5350	3650	55.1452
2250	74.3779	3750	54.0475
2350	73.0644	3850	52.9813
2450	71.6312	3950	51.9271
2550	69.9477	4050	50.9200
2650	68.3454	4150	49.9114
2750	66.7699	4250	48.9520
2850	65.2429	4350	47.9875
2950	63.8064	4450	47.0605
3050	62.4478	4550	46.1676
3150	61.1573	4650	45.1896

La Figura 4.11 muestra la evolución de la tasa binaria media con respecto a la distancia de la BS:

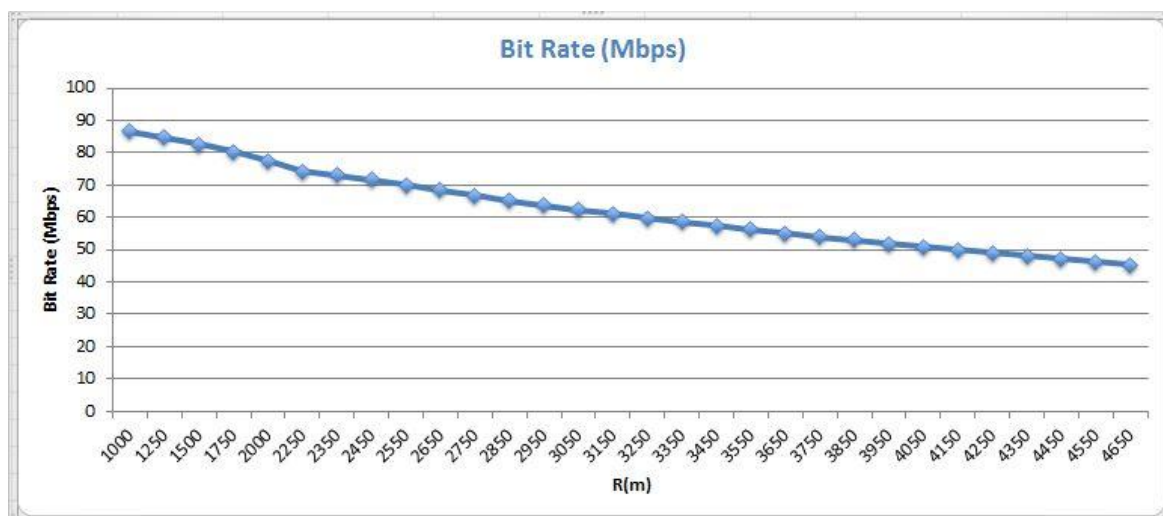


Figura 4.11: Evolución de la tasa binaria media a 2.6 GHz y SLL 15 dB

En la Figura 4.12, se puede apreciar alguna ligera variación con respecto al caso de la SLL a 15 dB, cuando la transmisión de datos deja de ser constante y comienza a disminuir. Sin embargo, esa caída de bits no es tan abrupta como la anterior.

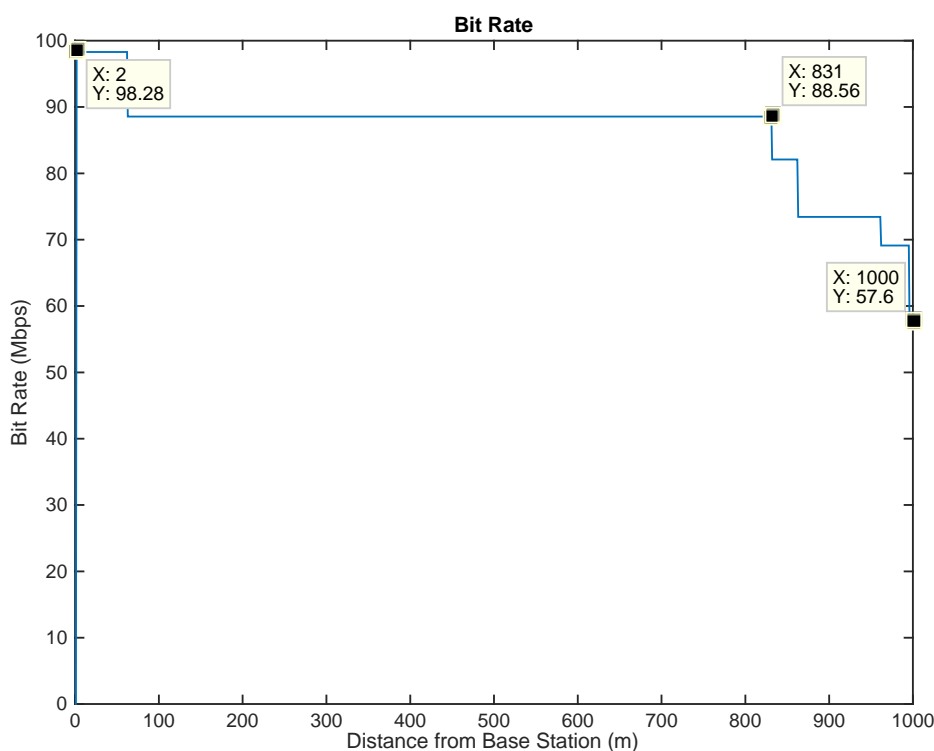


Figura 4.12: Representación de la tasa binaria en 2.6 GHz, $R = 1000$ m respecto a la BS con SLL 20 dB

Para finalizar, se comprueba cuál es la distancia máxima a la que se puede transmitir datos, que en este caso coincide más o menos con el valor en la banda a 800 MHz y es de 4550 metros, tal y como muestra la Figura 4.13:

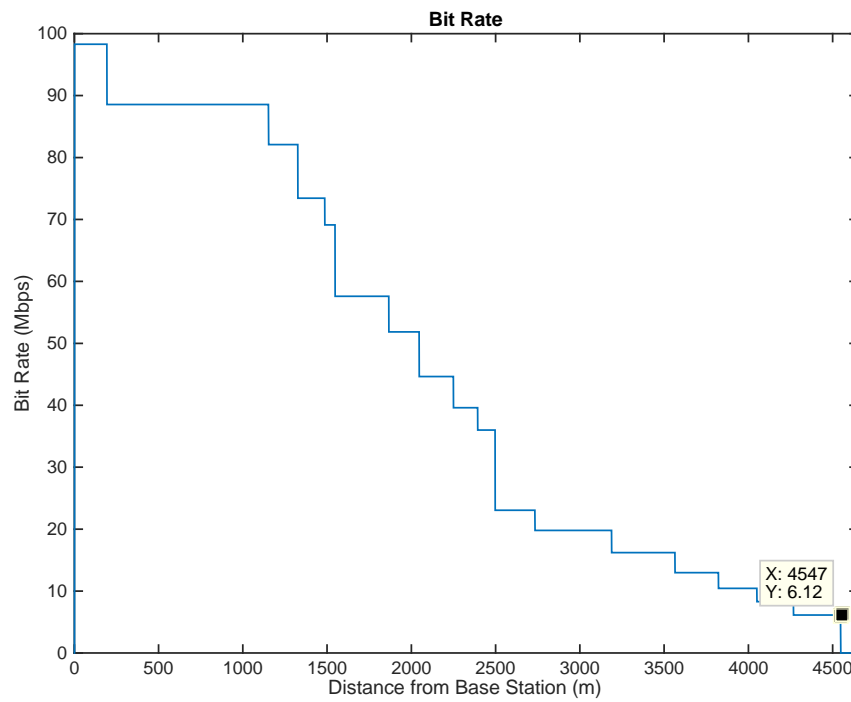


Figura 4.13: Representación de la tasa binaria con R máxima de la BS a 2.6 GHz

5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

Una vez finalizado este trabajo se puede adquirir una visión más precisa y realista de la tecnología LTE, entendiendo las prestaciones que ofrece y la evolución de las tecnologías móviles hasta su aparición, además del uso de distintas técnicas para mejorar su funcionamiento en concreto del *downlink*.

Tras evaluar los resultados de la SINR y de la tasa binaria tanto en la banda de 800 MHz como de 2.6 GHz, se afirma que esta última no es que no cumpla con los requisitos para ofrecer servicios de 4G LTE, sino que dadas las características de propagación de las ondas (*Dual-Slope*) a mayor frecuencia, menor alcance y capacidad de penetración en interiores por lo que el despliegue de una red LTE en 2.6 GHz requiere más antenas para lograr la misma cobertura que si se hiciera en la banda de 800 MHz. Por tanto, hay que valorar hasta qué punto se permite soportar los costes y las pérdidas por los fenómenos externos, ya que lo ideal es lograr un equilibrio entre una inversión necesaria y capacidad requerida.

Se ha comprobado que el uso de distintos modos de transmisión provoca cambios en el comportamiento de la red obteniendo diferentes resultados, ya sea utilizando múltiples antenas en recepción (SIMO, este escenario) o en transmisión (MIMO, tanto para 2x2 como 4x4). Esto solo tendrá efecto para el cálculo de la tasa binaria pudiendo duplicarse o cuadruplicarse según como se quiera transmitir.

Gracias a la Figura 4.8 y a la Figura 4.13 se puede saber cuál es la cobertura en este escenario, es decir, hasta qué distancia se siguen transmitiendo datos. Tanto en la banda de 800 MHz como en la de 2.6 GHz, la cobertura llega hasta los 4550 metros aproximadamente aunque la de 800 MHz ofrece un poco más de cobertura y más transferencia de datos en *downlink*.

Para llevar a cabo un estudio más minucioso de la viabilidad del proyecto habría que realizar un análisis mucho más detallado en cuanto a nivel de enlace y a nivel del sistema, como la cobertura que proporciona la antena o la evolución de la red de recursos. Es decir, probar qué antena es más beneficiosa, tanto las omnidireccionales como las multibanda.

5.2 Trabajo futuro

Para profundizar más en el tema y hacer un estudio más exhaustivo se propone algunas líneas futuras de investigación que se podrán realizar a partir del trabajo elaborado:

- Desarrollar el estudio con simulaciones más realistas, teniendo en cuenta todos los factores que pueden aparecer en este escenario.
- Estudio a gran escala en todas las líneas de alta velocidad que hoy en día están operativas en este país o fuera de sus fronteras.
- Aplicación de este estudio en el interior de los vagones.

Referencias

- [1] Keysight Technologies. “LTE-Advanced: Technology and Test Challenges, 3GPP Releases 10, 11, 12 and Beyond”. Application Note.
- [2] Jorge A. Ruiz Cruz. Teoría de la comunicación, 2007-2008. Asignatura de Grado de Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.
- [3] José Manuel Huidoro. “Comunicaciones Móviles: GSM, UMTS y LTE”. Ra-Ma, febrero 2012.
- [4] Harri Holma and Antti Toskala. “LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based RadioAccess”. John Wiley & Sons, LTD 2009.
- [5] Jaime Calle-Sanchez, Mariano Molina-García & José I. Alonso. “Top Challenges of LTE to become Next Generation Railway Communication System”. Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, ETSIT. Universidad Técnica de Madrid, España.
- [6] Ke Guan, Zhangdui Zhong and Bo Ai. “Assessment of LTE-R using High Speed Railway Channel Model”. Beijing Jiaotong University, 2011 China.
- [7] Ramón Muñoz. “Renfe comenzará a dar Wi-Fi en los AVE a finales de este año”. El país en octubre 2015, Madrid.
- [8] Trabajo de Fin de Grado de Andrea Sancho Fernández: Planificación de sistemas LTE en autopistas.
- [9] José Luis Masa Campos. Antenas y Compatibilidad Electromagnética, 2014. Asignatura de Grado de Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.
- [10] Características de la antena de la BS y de las antenas de MS:
<http://www.mars-antennas.com>
- [11] Información técnica sobre los Trenes de Alta Velocidad, TAV:
http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/
- [12] Bazil Taha Ahmed. Sistemas de Transmisión de Audio y Video, 2014. Asignatura de Grado de Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.

Glosario

A

AVE : Alta Velocidad Española

B

BER : Bit Rate Error

BS : Base Station

C

CDMA : Code Division Multiple Access

CQI : ChaneL Quality Indicator

E

EPC : Evolved Packet Core

EVM : Error Vector Magnitude

F

FDD : Frecuency Division Duplexing

G

GSM : Global System for Mobile communications

H

HSPA : High Speed data Packet Access

I

IP : Internet Protocol

ISI : Intersymbol Interference

ITU : International Telecommunication Union

L

LTE : Long Term Evolution

M

MCS : Esquema de modulación y codificación

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MME : Mobility Management Entity

MS : Mobile Station

O

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA : Orthogonal Frequency División Multiple Access

P

PAPR : Peak to Average Power Ratio

PSD : Power Spectral Density

Q

QoS : Calidad de servicio

R

RB : Resource block

S

SC- FDMA : Single Carrier-Frequency Division Multiple Access

SGW : Serving Gateway

SIMO : Single Input Multiple Output

SINR : Signal to Interference plus noise ratio

SLL : Side Lobe Level

T

TAV : Tren de Alta Velocidad

TDD : Time Division Duplexing

U

UE : User Equipment

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

UTRA : UMTS Terrestrial Radio Access

W

Wi-Fi : Wireless Fidelity

WiMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access

SIMBOLOS

3GPP : Third Generation Partnership Project

4G : 4 Generation

Anexos

A Antenas de estación base

En este escenario, se hace uso de dos tipos de antenas por un lado las correspondientes a la BS y por otro las MS que irán en el vehículo pero de estas últimas hablaremos en el siguiente apartado.

En el caso de las BS, se hace uso de una antena de parche direccional plana de alto rendimiento aplicable tanto en interiores como al aire libre y compatible tanto para la banda de frecuencia de 2.5 GHz como de 2.7 GHz, en la Figura A.1 se puede apreciar este tipo de antenas. Además es compatible con los estándares IEEE 802.16, 802.20 y WiMAX. Son antenas fabricadas sobre tecnología de sustrato impreso, de bajo coste pero de banda estrecha y con limitación de potencia [9].



Figura A.1: Antena de parche direccional plana

Las especificaciones de este tipo de antenas se recogen en la Tabla A.1 [10]:

Tabla A.1: Especificaciones de antena de parche plana

Frecuencia	2.5-2.7 GHz
Ganancia	14 dBi
Ancho de haz horizontal	30°
Ancho de haz vertical	30°
Impedancia	50 Ohm
Dimensiones	216 x 216 x 26 (mm)
Polarización	Horizontal o vertical

En la Figura A.2, el diagrama de radiación muestra tanto el nivel de SLL como los grados de caída a -3 dB, cuyo valor en este programa ronda los -20 dB:

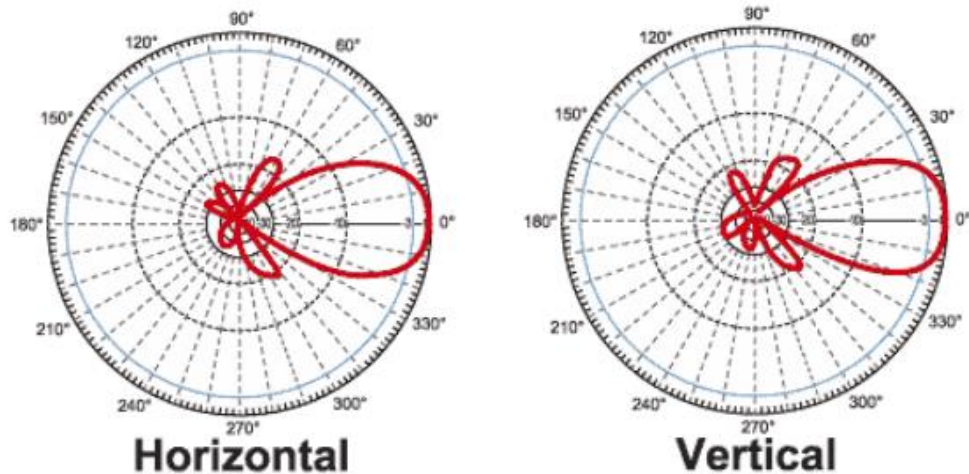


Figura A.2: Diagrama de radiación de una antena de parche direccional plana

El escenario se encuentra en un entorno que tiene la característica de ser abierto y de tener poca densidad en cuando a edificios o cualquier otro elemento, lo que conlleva a no poder aprovechar las ganancias de las técnicas MIMO por multiplexación espacial y en cambio usamos las técnicas SIMO, solo utiliza una antena de transmisión y varias antenas receptoras. Se llevan a cabo para reducir las pérdidas por multitrayecto. En la Figura A.3 se muestra este tipo de antenas:



Figura A.3: Técnica de las antenas SIMO

B Antenas del AVE

Para el caso de las antenas de este vehículo en este caso TAV, se usan antenas omnidireccionales de doble banda como la de la Figura B.1, adecuadas para una comunicación inalámbrica. Están fabricadas con aluminio, por eso pesan poco y tienen una construcción duradera, siendo resistentes al agua, a la corrosión o al fuego. Este tipo de antenas puede ser compatible con aplicaciones IEEE 802.11a, 802.11b o 802.11g, LAN, sistemas Wi-Fi o sistemas punto a punto entre otros.



Figura B.1: Antena omnidireccional de doble banda

Las especificaciones de este tipo de antenas se recogen en la Tabla B.1 [10]:

Tabla B.1: Especificaciones de antena omnidireccional de doble banda

Frecuencia	2.3-2.7 GHz
Ganancia	2 dBi
Impedancia	50 Ohm
Dimensiones	54 x 34 mm
Polarización	Lineal vertical

En la Figura B.2, el diagrama de radiación muestra tanto el nivel de SLL como los grados de caída a -3 dB:

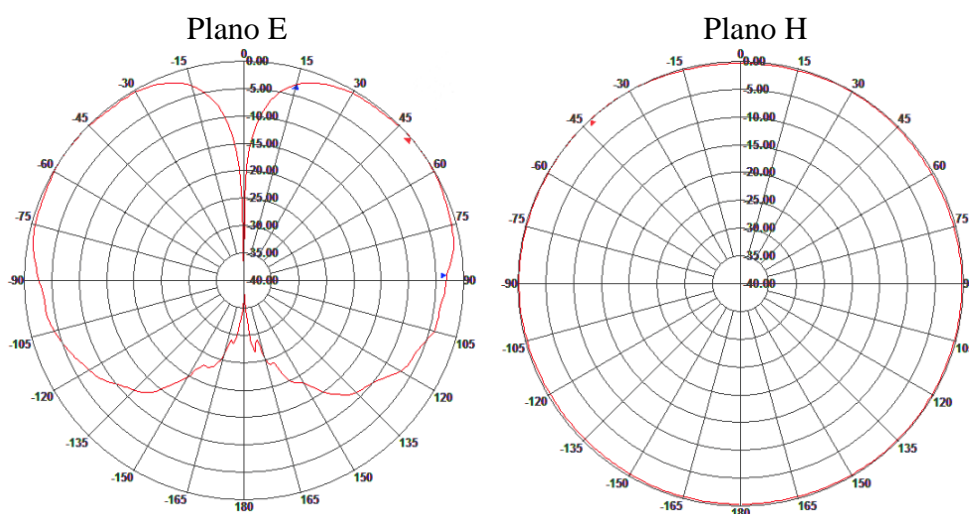


Figura B.2: Diagrama de radiación de antena omnidireccional de doble banda

C Análisis de un caso real

Los estudios realizados anteriormente no están llevados a cabo sobre una situación real. En este anexo se va a realizar un pequeño análisis de un trayecto entre Madrid y Ciudad Real como se muestra en la Figura C.1 separados por 210 km y con el AVE Serie 103.

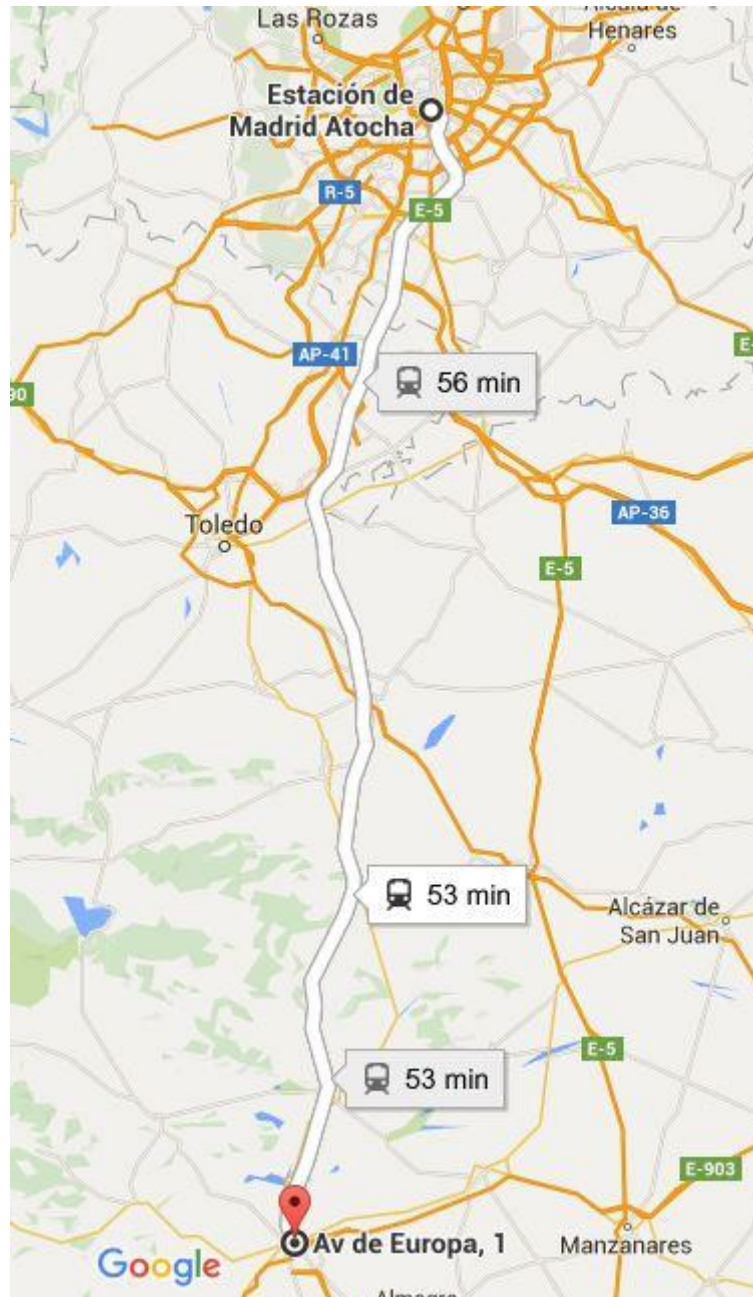


Figura C.1: Recorrido Madrid-Ciudad Real

En la Tabla C.1, se muestran cuantas antenas teóricas son necesarias para cubrir todo el trayecto según la distancia entre ellas.

Tabla C.1: Número total de antenas teóricas para cubrir el trayecto

R (metros)	Número de antenas
1000	210
1250	168
1500	140
1750	120
2000	105
2250	94
2500	84
2750	77
3000	70
3250	65
3500	60
3750	56
4000	53
4250	50
4500	47

Ahora se puede valorar cada cuantos metros se pueden colocar las antenas, según las pérdidas que se tolere y de cuanto presupuesto se disponga. Para evitar posibles pérdidas en las curvas más pronunciadas como se muestra en la Figura C.2, se implanta una antena base extra y se añade otra en el kilómetro cero para asegurar la cobertura nada más comenzar el trayecto.

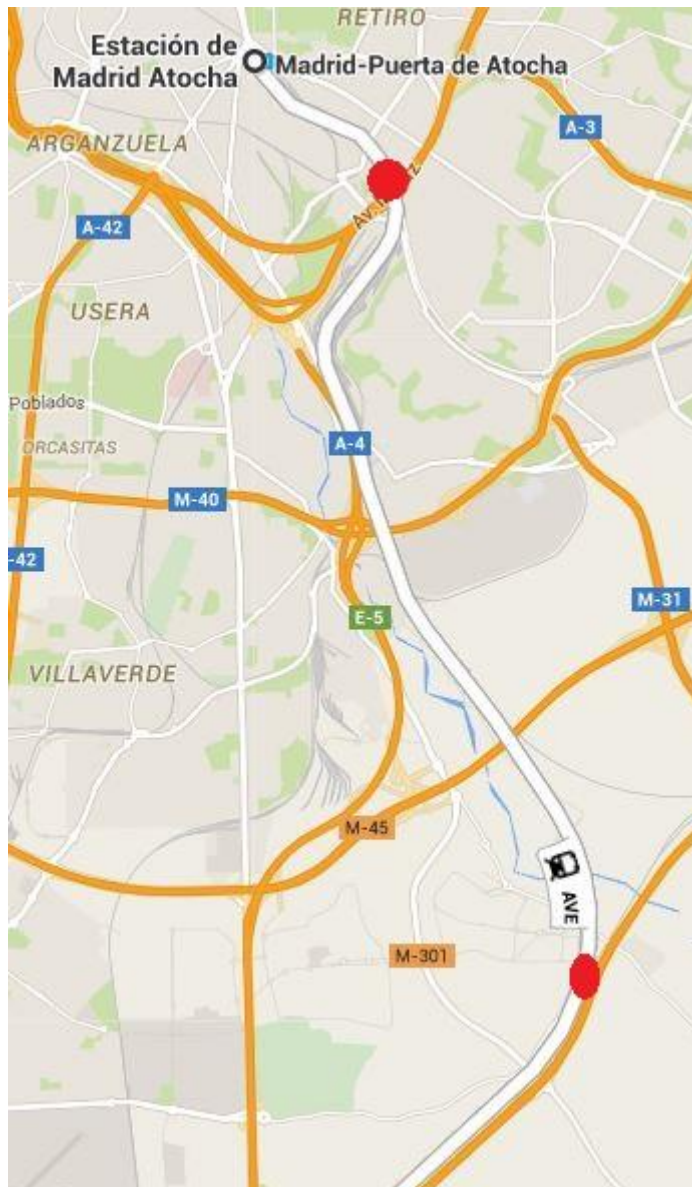


Figura C.2: Antenas de base extra para curvas pronunciadas

Esto se debe a que el tipo de antenas de la BS que se utiliza es omnidireccional, es decir la señal está orientada en una dirección muy determinada y con un haz estrecho de largo alcance entonces, cuando se produce un cambio brusco no se puede asegurar que esa región determinada disponga de cobertura totalmente.

Finalmente en la Tabla C.2 se encuentra el número total de antenas que utilizamos añadiendo las mencionadas anteriormente.

Tabla C.2: Número total de antenas prácticas para cubrir el trayecto

R (metros)	Número de antenas
1000	213
1250	171
1500	143
1750	123
2000	108
2250	97
2500	87
2750	80
3000	73
3250	68
3500	63
3750	59
4000	56
4250	53
4500	50

